

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Мостовской М. В., Слепцов В. В., Лемещенко С. М.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
МНОГОКООРДИНАТНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

5

Мищенко В. И., Верхушин С. С.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
КАНАЛА МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЕЕ НАДЕЖНОСТИ

16

Михайлов Е. А., Мищенко В. И.

МЕТОДИКА АДАПТАЦИИ СРОКА СЛУЖБЫ
И ПАРАМЕТРОВ СТРАТЕГИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ МОБИЛЬНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА К УРОВНЮ ЕГО НАДЕЖНОСТИ

23

Годунов А. И., Ерофеев М. В., Избасов А. Г., Мухамбетов А. М., Головин П. Д.

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ ЛИЧНОГО
СОСТАВА ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ МАЛОГАБАРИТНЫМ
БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ
ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ И ДИВЕРСИОННЫХ ГРУПП

29

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Чихрина У. С.,

Александров В. С., Артамонов Д. В.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ Sb НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ
СТРУКТУРУ И МОДЕЛЬ ЗАМЕЩЕНИЯ $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$
С ОБРАЗОВАНИЕМ ДЕФЕКТОВ КИСЛОРОДА

37

Филатова А. А., Пауткин В. Е., Тразанов Д. В.
СОЗДАНИЕ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУР ДАТЧИКОВ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРООБРАБОТКИ КРЕМНИЯ 46

Щербаков М. А., Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Кушнир А. П., Володина А. М.
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО РОБОТА 52

Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Баринев А. П., Ефимов А. Е., Михайлов П. О.
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ 67

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Ишков А. С., Максимов П. А., Селиверстов А. В.
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ 73

**Никиткин А. С., Семенов А. Д., Пастухов А. М.,
Рубцов И. А., Цветков А. П., Печерская Е. А.**
КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ МИМ-ТЕХНОЛОГИИ 80

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Трофимов А. А., Баранов В. А., Ильин К. А., Першин Е. А.
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА АППАРАТА ДЛЯ НЕПРЯМОГО МАССАЖА СЕРДЦА
В ПРОЦЕССЕ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ 89

Бодин А. Ю., Бодин О. Н., Крамм М. Н.
ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
В СИСТЕМЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ 96

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Lemeshchenko S.M.

SIMULATION MODEL OF A TRACKING ELECTRIC
DRIVE FOR MULTI-COORDINATE MACHINING CENTERS

5

Mishchenko V.I., Verkhushin S.S.

A MODEL OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF A MULTICHANNEL
MEASURING SYSTEM OF GROUND-BASED TECHNOLOGICAL
EQUIPMENT WITH LIMITED INFORMATION ABOUT ITS RELIABILITY

16

Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I.

METHOD OF ADAPTATION OF THE SERVICE LIFE AND PARAMETERS
OF THE METROLOGICAL MAINTENANCE STRATEGY
OF A MOBILE METROLOGICAL COMPLEX TO THE LEVEL

23

Godunov A.I., Erofeev M.V., Izbasov A.G., Mukhambetov A.M., Golovin P.D.

METHODS AND TECHNICAL MEANS OF TRAINING COUNTERING
SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL VEHICLES
OF TERRORIST AND SABOTAGE GROUPS

29

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Chikhrina U.S.,

Aleksandrov V.S., Artamonov D.V.

THE EFFECT OF Sb DOPING ON CRYSTAL STRUCTURE AND THE $\text{Sn}^{4+} \rightarrow$
 Sb^{5+} SUBSTITUTION MODEL WITH OXYGEN DEFECT FORMATION

37

Filatova A.A., Pautkin V.E., Trazanov D.V.

CREATION OF NEW ELEMENTS OF SENSOR STRUCTURES
OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS
BASED ON SILICON MICROPROCESSING TECHNOLOGIES

46

Shcherbakov M.A., Azarnov N.V., Kashitsyn S.D., Kushnir A.P., Volodina A.M.
THE DIGITAL TWIN OF A MOBILE TRANSPORT ROBOT

52

Azarnov N.V., Kashitsyn S.D., Barinov A.P., Efimov A.E., Mikhailov P.O.
CONTROL SYSTEM FOR GROUND MOBILE ROBOTS

67

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Ishkov A.S., Maksimov P.A., Seliverstov A.V.
SPECIALISED STAND FOR MEASURING PARAMETERS
OF ADAPTIVE CONTROL CHANNELS

73

***Nikitkin A.S., Semenov A.D., Pastukhov A.M.,
Rubtsov I.A., Tsvetkov A.P., Pecherskaya E.A.***
PARAMETER CONTROL IN THE PROCESS OF MANUFACTURING
PRODUCTS USING MIM TECHNOLOGY

80

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Trofimov A.A., Baranov V.A., Ilin K.A., Pershin E.A.
INTELLIGENT INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM
OF THE DEVICE FOR CARDIOPULMONARY RESUSCITATION

89

Bodin A.Yu., Bodin O.N., Kramm M.N.
FEATURES OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION IN MULTIPLE
ELECTROCARDIOSIGNAL RECORDING SYSTEM

96

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 62-589.23

doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-1

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МНОГОКООРДИНАТНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

М. В. Мостовской¹, В. В. Слепцов², С. М. Лемешенко³

^{1,2,3} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹mvmost@yandex.ru, ²vsleptsov@gmail.ru, ³lemele1999@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность цели.* Описано актуальное направление развития отечественного станкостроения – разработка и внедрение многокоординатных обрабатывающих центров. Приведены основные направления совершенствования многокоординатных обрабатывающих центров за счет информационно-измерительных и управляющих систем. Доказана необходимость применения имитационного компьютерного моделирования при проектировании каналов управления информационно-измерительных и управляющих систем многокоординатных обрабатывающих центров. *Материалы и методы.* Разработана имитационная модель следящего электропривода (канала управления положением) на базе двигателя постоянного тока, включающая в себя исполнительный механизм типа шарико-винтовая передача. Разработанная модель выполнена с применением библиотеки Simscape Mechanical. *Результаты и выводы.* Представлены результаты исследования, доказывающие работоспособность разработанных моделей и возможность их применения при проектировании каналов управления информационно-измерительных и управляющих систем многокоординатных обрабатывающих центров. Полученные результаты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к металлорежущему оборудованию.

Ключевые слова: следящий электропривод, регулятор положения, имитационная модель, шарико-винтовая передача, дрейф линейного перемещения

Для цитирования: Мостовской М. В., Слепцов В. В., Лемешенко С. М. Имитационная модель следящего электропривода многокоординатных обрабатывающих центров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 5–15. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-1

SIMULATION MODEL OF A TRACKING ELECTRIC DRIVE FOR MULTI-COORDINATE MACHINING CENTERS

M.V. Mostovskoy¹, V.V. Sleptsov², S.M. Lemeshchenko³

^{1,2,3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹mvmost@yandex.ru, ²vsleptsov@gmail.ru, ³lemele1999@yandex.ru

Abstract. *Background.* The article describes the current direction of development of the domestic machine tool industry – the development and implementation of multi-coordinate machining centers. The main directions of improving multi-coordinate machining centers due to information-measuring and control systems are given. The necessity of using computer simulation modeling in designing control channels of information-measuring and control systems of multi-coordinate machining centers is proved. *Materials and methods.* A simulation model of a servo electric drive (position

control channel) based on a DC motor has been developed, including an actuator of the ball screw type. The developed model is made using the Simscape Mechanical library. *Results and conclusions.* The article presents the results of the study proving the operability of the developed models and the possibility of their application in designing control channels of information-measuring and control systems of multi-coordinate machining centers. The obtained results meet the requirements for metal-cutting equipment.

Keywords: servo drive, position controller, simulation model, ball screw transmission, linear motion drift

For citation: Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Lemeschenko S.M. Simulation model of a tracking electric drive for multi-coordinate machining centers. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-1

Введение

Актуальным направлением развития отечественного и зарубежного станкостроения было и остается разработка, производство и совершенствование технологических машин [1].

Массовое производство деталей специального назначения, таких как лопатки двигателей самолетов, подшипники качения, элементы механических передач, корпуса оптических приборов и другое невозможно представить без использования многокоординатных обрабатывающих центров (МОЦ) и координатных измерительных машин (КИМ). Внедрение подобного рода оборудования в производственные процессы стало общемировым трендом, целью которого является повышение производительности в металлообработке и обеспечение высокого качества конечной продукции [2, 3].

Основной специфической особенностью данных технологических машин является проведение всех типов операций, необходимых для получения готового изделия. К таким операциям относятся: точение, фрезерование, сверление, лазерная обработка всех типов, шлифовка (черновая и чистовая) и др.

Обрабатывающие центры классифицируются по следующим признакам:

- количеству управляемых координат (осей). Большинство металлообрабатывающих станков имеют 3-координатную систему (X , Y , Z) перемещения рабочего инструмента. Современные МОЦ имеют от 4 до 6 координат. Увеличение количества управляемых координат позволяет обрабатывать детали сложной формы и увеличить производительность за счет устранения необходимости в дополнительной обработке;

- расположению шпинделя относительно обрабатываемой детали. Вертикальное расположение шпинделя часто применяется в деревообрабатывающих станках (фрезерная обработка) и лазерных обрабатывающих центрах со сканированием сфокусированного лазерного пятна (в качестве шпинделя используется оптическая система). Подобная компоновка включает в себя от 24 до 30 позиций рабочего инструмента.

В случае горизонтального расположения шпинделя рабочий инструмент перемещается вдоль обрабатываемого изделия. Подобная компоновка применяется для обработки крупных металлических изделий и корпусных деталей. Компоновка имеет от 30 и более позиций рабочего инструмента.

- наличию или отсутствию систем автоматической смены инструмента, контроля и управления режущей кромки, подачи охлаждающих газов или жидкостей и др.;

- количеству рабочих столов. Существуют обрабатывающие центры с одним, двумя и несколькими рабочими столами;

- точности обработки и компоновки контура управления положением. Существуют прецизионные и сверхпрецизионные обрабатывающие центры. Точность обработки зависит от погрешности датчика положения и постоянства его метрологических характеристик, настройки регулятора положения (отсутствие перерегулирования) и качества исполнения механических преобразователей движения (редукторов, передач, сцеплений и др.).

В процессе проектирования и настройки информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) МОЦ разработчики прибегают к синтезу регуляторов и оценке технических характеристик следящих электроприводов с помощью специализированных алгоритмов, основанных на исследовании имитационных компьютерных моделей.

Для решения задачи проектирования элементов следящего электропривода разработано большое количество прикладных компьютерных пакетов, таких как Multisim, OrCAD, TCAD и др. В настоящее время наиболее удобным инструментом для моделирования сложных систем является MATLAB Simulink.

Структурная схема ИИУС МОЦ

На основании проведенного авторами анализа существующих отечественных и зарубежных МОЦ составим общую структурную схему ИИУС (для 3-координатных МОЦ), отражающую взаимосвязи элементов верхнего, среднего и нижнего уровня (рис. 1).

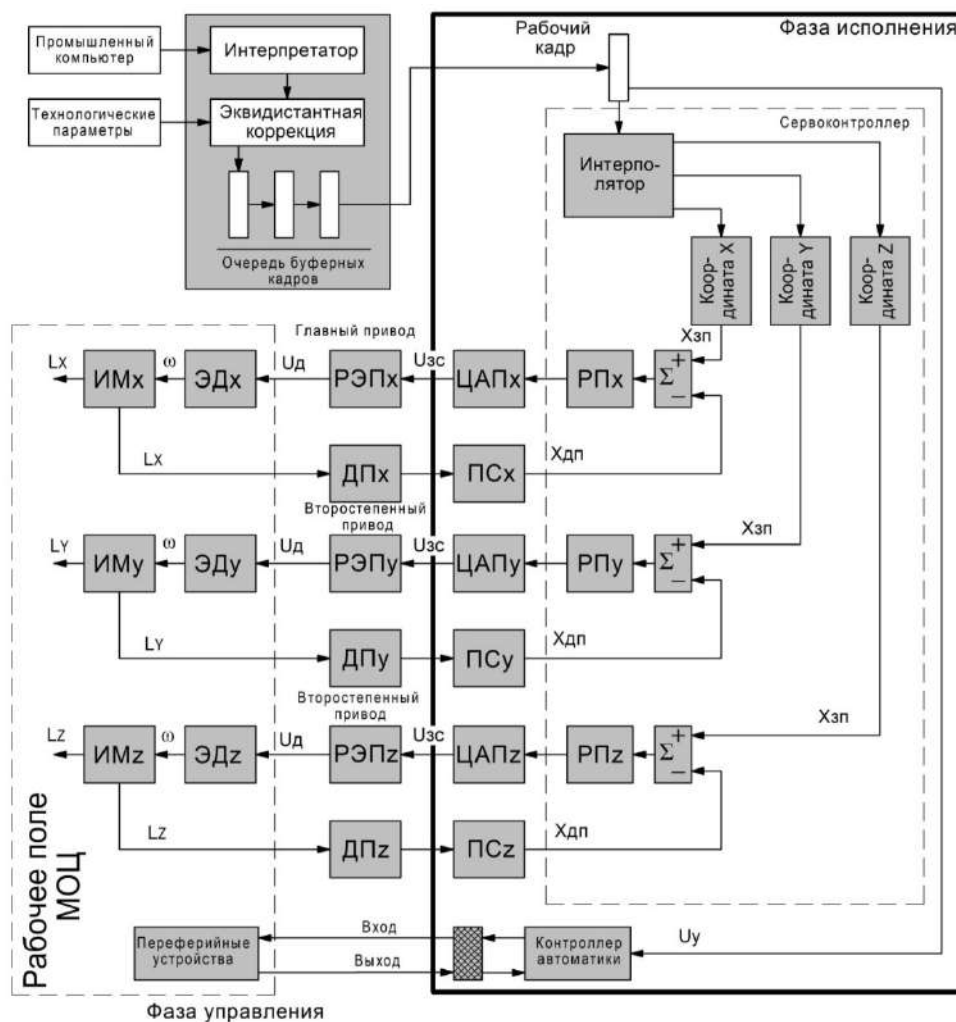


Рис. 1. Структурная схема ИИУС МОЦ

На рис. 1 приняты следующие обозначения: РПх, РПу, РПz – регуляторы положения координат X, Y, Z; ЦАПх, ЦАПу, ЦАПz – цифроаналоговые преобразователи для координат X, Y, Z; ПСх, ПСу, ПСz – преобразователи сигналов датчиков положения координат X, Y, Z; ДПх, ДПу, ДПz – датчики положения для координат X, Y, Z; РЭПх, РЭПу, РЭПz – регулируемый электропривод для координат X, Y, Z; ЭДх, ЭДу, ЭДz – электродвигатели координат X, Y, Z; ИМх, ИМу, ИМz – исполнительные механизмы координат X, Y, Z; $x_{зп}$ – сигнал задания положения; $x_{дп}$ – выходной сигнал датчика положения; $U_{зп}$ – сигнал задания скорости; $U_{д}$ – напряжение управления электродвигателем; ω – скорость вращения электродвигателя; U_y – набор управляющих сигналов для периферийных устройств; L_x, L_y, L_z – перемещение рабочего инструмента в пределах координат X, Y, Z.

ИИУС МОЦ (рис. 1) работает следующим образом. Согласно программе (язык G) обработки детали, составленной оператором, формируются рабочие кадры, которые последовательно обрабатываются интерполятором. Интерполятор задает последовательность управляющих воздействий $x_{зп}$ для перемещения рабочего инструмента (органа) в соответствии с траекторией обрабатываемой детали. Для формирования сигнала управления скоростью перемещения рабочего инструмента в систему вводятся регуляторы положения РПх, РПу, РПz, выполненные программно. Регуляторы положения РПх, РПу, РПz преобразуют значения, полученные с датчиков положения $x_{дп}$, сравнивают их с сигналами задания $x_{зп}$ и вычисляют управляющий сигнал задания скорости для РЭПх, РЭПу, РЭПz. Сигнал задания скорости представляет собой

напряжение, меняющееся во времени согласно управляющей программе (ГОСТ 27803–91). Для формирования сигналов задания в каждый управляющий канал внедрен цифроаналоговый преобразователь (ЦАПх, ЦАПy, ЦАПz).

Далее аналоговый сигнал задания скорости перемещения рабочего инструмента поступает на вход информационного канала электропривода. Данный информационный канал предназначен для управления параметрами электропривода (ток в обмотках электродвигателя, момент электродвигателя, скорость перемещения и др.) в соответствии с требованиями технологического процесса. Электропривод состоит из электродвигателя (ЭДх, ЭДy, ЭДz), передаточного (ИМх, ИМу, ИМz), преобразовательного и информационно-управляющего устройства (ГОСТ 50369–92). Также в состав электропривода входят датчики обратной связи.

РЭПх, РЭПу, РЭПz, входящие в состав ИИУС МОЦ, обеспечивают выполнение следующих технических функций:

- установка требуемой скорости (перемещения или вращения) в пределах заданного диапазона;
- стабилизация установившегося значения скорости с заданной точностью при возмущающих воздействиях, например, изменения внешнего момента на валу электродвигателя;
- регулирование момента и скорости, развиваемых электрическим двигателем для формирования требуемого характера изменения скорости и ускорения.

Преобразовательные устройства (силовой преобразователь) применяются для целенаправленного и экономичного изменения параметров движения электропривода (скорость, момент и др.) Данные устройства представляют собой преобразователь, выполненный на силовых полупроводниковых приборах (тиристоры, транзисторы, запираемые тиристоры, управляемые реле и др.) Информационно-управляющее устройство состоит из блоков обработки информации, преобразования сигналов и защиты. Данное устройство формирует сигналы управления преобразовательным устройством, обрабатывает информацию с датчиков обратной связи (ток, напряжение, скорость и др.), а также проводит диагностику системы. Информационно-управляющее устройство может быть выполнено на аналоговой, комбинированной и цифровой элементной базе.

В качестве исполнительных механизмов МОЦ часто используются ротационные электродвигатели совместно с шарико-винтовой передачей (ШВП) или линейные электрические двигатели.

Для выполнения преобразования вращательного движения электродвигателя в поступательное большинство МОЦ, выполняющие токарные, фрезерные, шлифовальные и комбинированные технологические работы, оснащены ШВП.

Разработка имитационной модели следящего электропривода

Согласно анализу структурной схемы (рис. 1) и научной литературы [4–6] составим имитационную модель следящего электропривода, входящего в состав ИИУС МОЦ для одной координаты. Имитационная модель следящего электропривода, выполненная в программном пакете MATLAB Simulink, представлена на рис. 2.

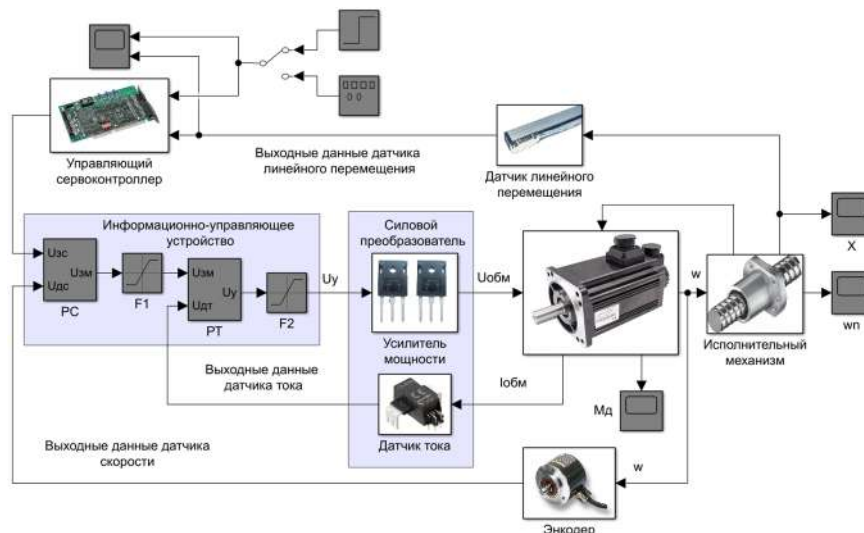


Рис. 2. Имитационная модель следящего электропривода MATLAB Simulink

$$\left\{ \begin{aligned} \omega(s) &= [k_M I(s) - M_C(s)] \frac{1}{J_S}; \\ I(s) &= [U_{o\delta M}(s) - k_V \omega(s)] \frac{1/R_{o\delta M}}{1 + L_{o\delta M}s}; \\ U_{o\delta M}(s) &= [k_{yM} U_Y(s) - U_{o\delta M}(s)] \frac{1}{T_{yM}s}; \\ U_Y(s) &= [U_{3M}(s) - k_{dT} I(s)] W_{PT}(s); W_{PT}(s) = k_{PT}; \\ U_{3M}(s) &= [U_{3C}(s) - k_{dC} \omega(s)] W_{PC}(s); W_{PC}(s) = k_{PC} \frac{T_{PC1}s + 1}{T_{PC2}s + 1}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $U_{\text{н}}(s)$, $U_{\text{зм}}(s)$, $U_{\text{зс}}(s)$ – сигналы задания напряжения, момента и скорости электродвигателя соответственно; $W_{\text{рт}}(s)$, $W_{\text{рс}}(s)$ – передаточная функция регулятора тока и регулятора скорости соответственно; $k_{\text{дт}}$, $k_{\text{дс}}$ – постоянные коэффициенты датчиков тока и скорости соответственно; $k_{\text{рт}}$, $k_{\text{рс}}$ – постоянные коэффициенты регуляторов тока и скорости соответственно; $T_{\text{рт}}$, $T_{\text{рс}}$ – постоянные времени регуляторов тока и скорости соответственно.

Контур обратной связи, отвечающий за регулировку положения рабочего инструмента, настраивается на технический оптимум. Данный контур замыкает датчик линейного перемещения с элементами верхнего уровня ИИУС МОЦ, а именно, с управляющим сервоконтроллером, встроенным в промышленный компьютер.

Исходя из условия настройки на технический оптимум уравнение, описывающее работу регулятора положения, примет вид

$$U_{\text{зс}}(s) = [U_{\text{зп}}(s) - k_{\text{дп}}X(s)] \frac{k_{\text{дс}}}{8k_{\text{дп}}T_{\text{ум}}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{зп}}(s)$ – сигнал задания положения; $X(s)$ – положение рабочего инструмента; $k_{\text{дп}}$ – постоянный коэффициент передачи датчика положения; $T_{\text{ум}}$ – постоянная времени регулятора положения.

Примеры расчетов (основные выражения) коэффициентов датчиков обратной связи и регуляторов, входящих в состав информационно-управляющего устройства, приведены в источниках [8, 9].

Для корректной работы имитационной модели (см. рис. 2) в нее вводятся нелинейные элементы, которые ограничивают значения сигналов задания напряжения, момента, скорости, положения и др. Так, например, выходные сигналы аналоговых регуляторов обычно лежат в диапазоне от -10 до $+10$ В (зависит от схемотехнических решений). Для реализации данного условия используется нелинейность типа насыщение:

$$F_N = \begin{cases} B & \text{при } x > b; \\ B \cdot x & \text{при } |x| \leq b; \\ -B & \text{при } x < -b, \end{cases} \quad (5)$$

где B – максимальное значение выходного сигнала; b – значение входного сигнала.

Для моделирования действия момента трения используется нелинейность типа двухпозиционного реле:

$$F_{\text{fr}} = \begin{cases} B & \text{при } b > 0; \\ -B & \text{при } 0 \leq b. \end{cases} \quad (6)$$

Известно, что моделирование мехатронных систем является сложной задачей, требующей обширных инженерных (практических) и теоретических знаний в различных областях науки. Для моделирования работы исполнительных механизмов применяются различные инструменты и библиотеки, входящие в программный пакет MATLAB Simulink.

Перспективным инструментом для построения сложных гибридных объектов стала библиотека Simscape Mechanical. Она упрощает процесс проектирования имитационной модели за счет введения готовых блоков элементов электротехники, механики, гидравлики и др. Имитационная модель исполнительного механизма, выполненная на основе блоков библиотеки Simscape Mechanical, представлена на рис. 4.

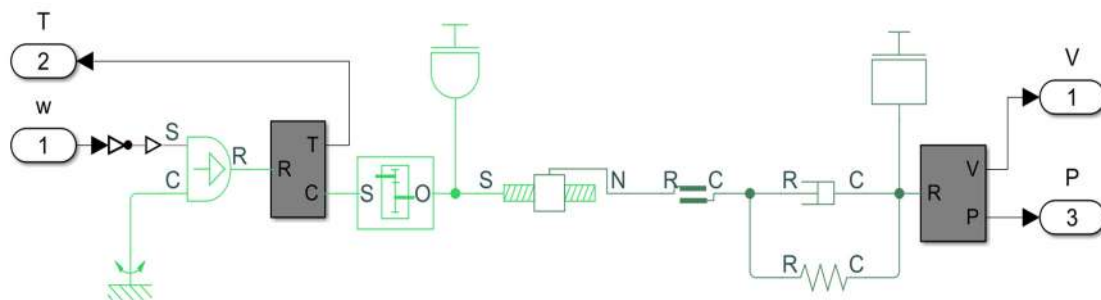


Рис. 4. Имитационная модель исполнительного механизма MATLAB Simulink

В табл.1 приведены параметры имитационных моделей электродвигателя (см. рис. 3) и исполнительного механизма (рис. 4), полученные при анализе технической документации и теоретических вычислений.

Таблица 1

Параметры модели

Наименование параметра модели	Значение	Единицы измерения
Индуктивность обмотки	1	мГн
Сопротивление обмотки	1,2	Ом
Коэффициент передачи по моменту	0,23	Н·м/А
Коэффициент передачи по ЭДС	0,29	В·с/рад
Приведенный к валу момент инерции	0,00005	кг·м ²
Передаточное число редуктора	1	–
Ход винта	2	мм/рад
Сила трения Кулона	20	Н
Жесткость механической передачи	10	Н/мм
Момент инерции винта	0,00002	кг·м ²
Масса, закрепленная на ШВП	35	кг
Коэффициент демпфирования	300	Н·с/м ²

Далее проведем исследование разработанной имитационной модели следящего электропривода (см. рис. 2).

Анализ результатов моделирования

Рассмотрим динамику процессов, происходящих в имитационной модели следящего электропривода (положение, скорость электродвигателя, ток в обмотке электродвигателя, скорость перемещения массы) со следующими параметрами: $K_{ДП} = 10\,000$ диск./м; $K_{РП} = 0,025$ В/диск.

На рис. 5–8 представлены результаты моделирования системы при входных значениях перемещения (задание перемещения): 100, 1000, 5000, 10 000 диск.

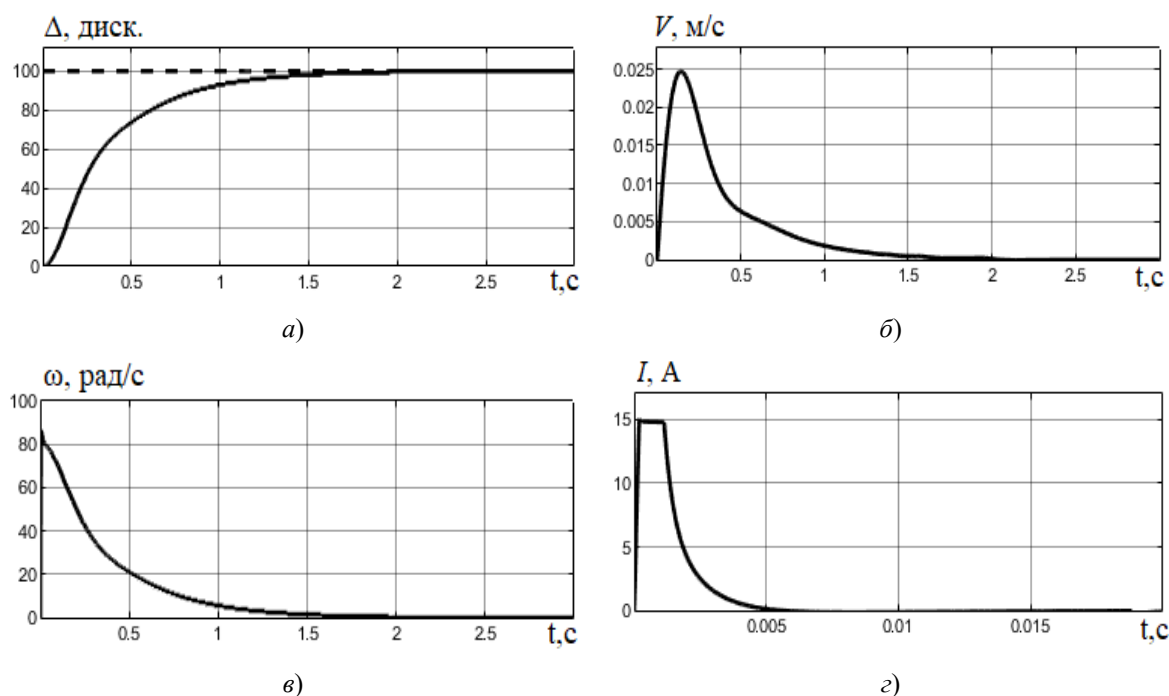


Рис. 5. Результаты моделирования системы при входном значении задания положения 100 диск.:

a – выходной сигнал датчика положения; $б$ – скорость перемещения массы;
 $в$ – скорость вращения электродвигателя; $з$ – ток в обмотке электродвигателя

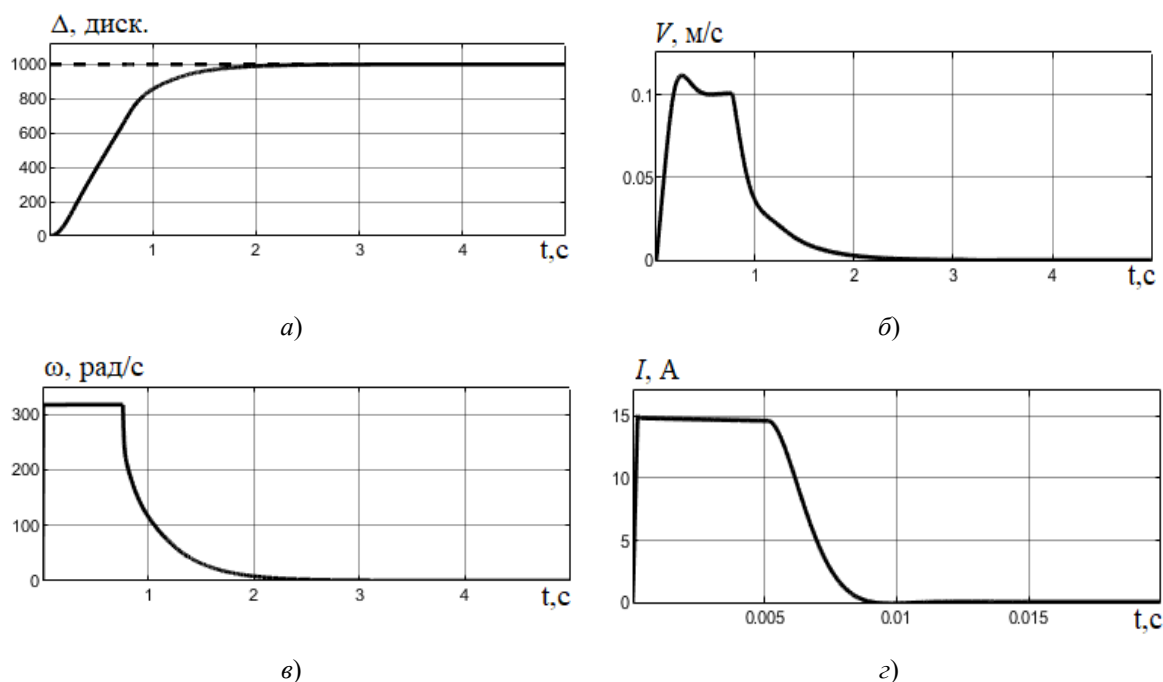


Рис. 6. Результаты моделирования системы при входном значении задания положения 1000 диск.:

a – выходной сигнал датчика положения; $б$ – скорость перемещения массы;
 $в$ – скорость вращения электродвигателя; $г$ – ток в обмотке электродвигателя

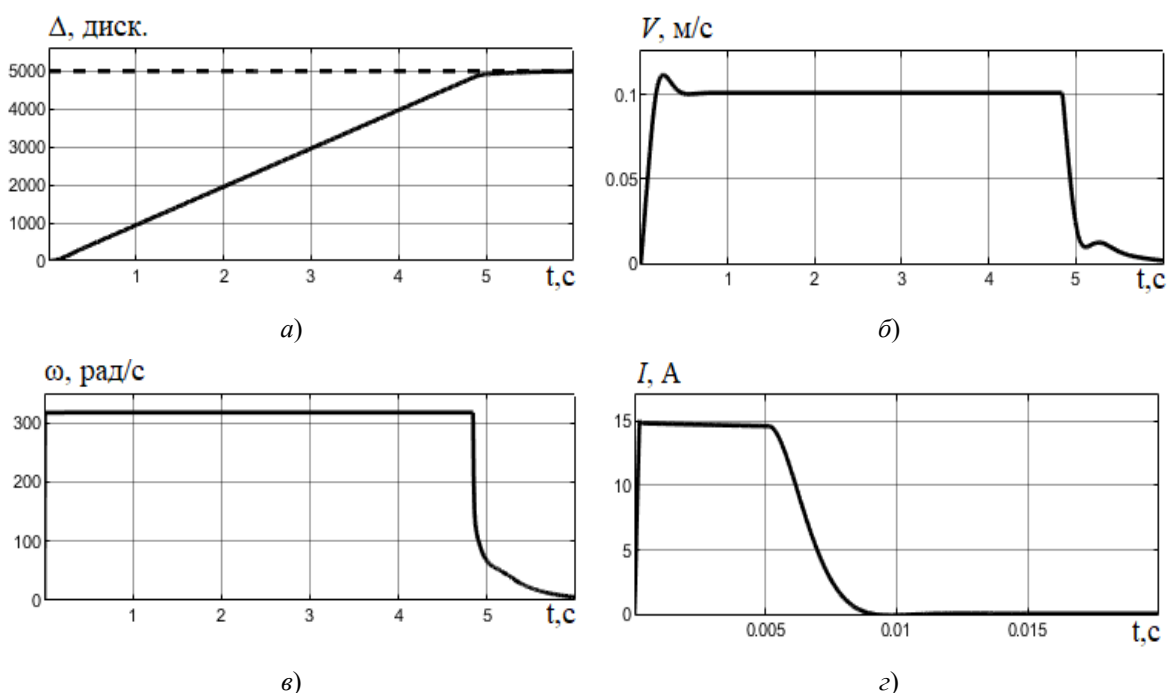


Рис. 7. Результаты моделирования системы при входном значении задания положения 5000 диск.:

a – выходной сигнал датчика положения; $б$ – скорость перемещения массы;
 $в$ – скорость вращения электродвигателя; $г$ – ток в обмотке электродвигателя

Проанализировав полученные результаты моделирования (рис. 5–8), можно сделать вывод, что разработанные модели исполнительного механизма и регулируемого электропривода работоспособны и могут быть использованы при настройке каналов управления координатой МОЦ. Выходной сигнал датчика положения демонстрирует правильность настройки регулятора исходя из отсутствия перерегулирования (ГОСТ 27803–91), а суммарное значение дрейфа линейного перемещения не превышает ± 2 диск.

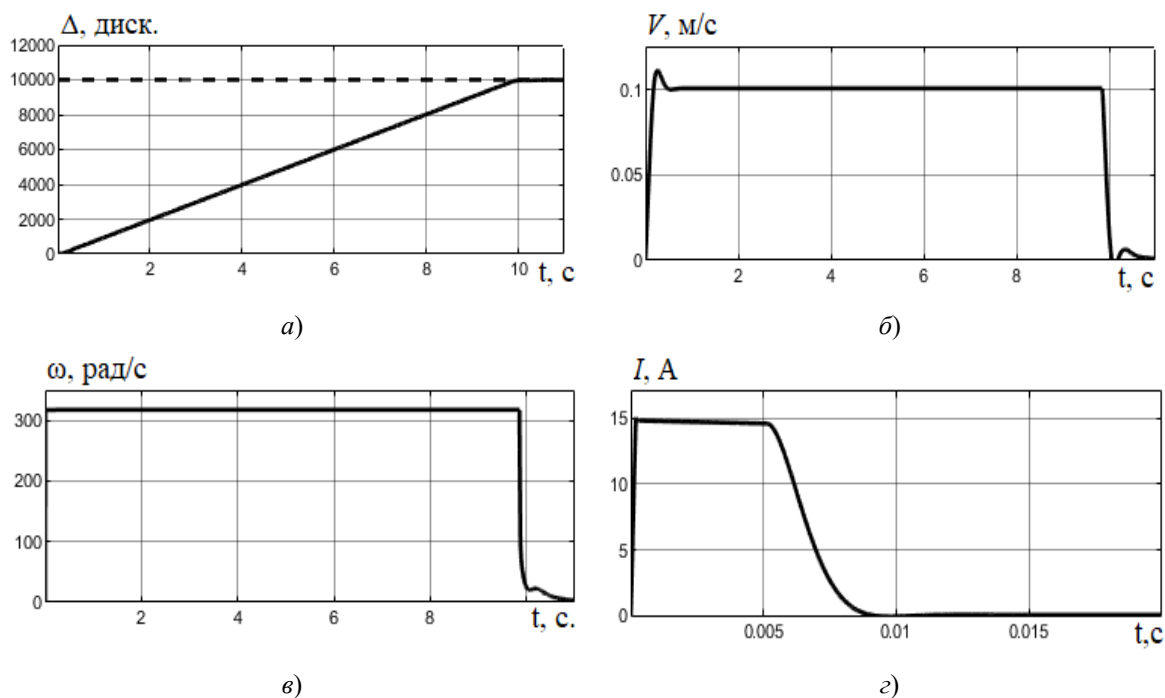


Рис. 8. Результаты моделирования системы при входном значении задания положения 10 000 диск.:

а – выходной сигнал датчика положения; *б* – скорость перемещения массы; *в* – скорость вращения электродвигателя; *г* – ток в обмотке электродвигателя

Заключение

На основании результатов, полученных авторами в данной статье, можно сделать следующие выводы:

- использование имитационных моделей является неотъемлемой частью научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с проектированием МОЦ всех типов;
- важным направлением совершенствования ИИУС МОЦ является разработка следящих электроприводов;
- рассмотрена обобщенная структурная схема ИИУС МОЦ (см. рис. 1) и приведены математическая и имитационная модели следящего электропривода на базе ДПТ (см. рис. 3);
- разработана имитационная модель исполнительного механизма МОЦ типа ШВП в программном пакете MATLAB Simulink и библиотеки Simscape Mechanical (см. рис. 4);
- полученные результаты моделирования (см. рис. 5–8) не противоречат требованиям, предъявляемым к следящим электроприводам, входящим в состав ИИУС МОЦ (ГОСТ 27803–91).

Полученные авторами результаты и модели могут быть использованы инженерами и научными работниками при проектировании ИИУС МОЦ и другого технологического оборудования, в состав которого входят системы взаимосвязанных следящих электроприводов (координатные системы, роботы манипуляторы и др.).

Список литературы

1. Макаров В. Ф., Песин М. В., Норин А. О. Особенности применения многокоординатных шлифовальных станков с ЧПУ для повышения производительности, качества и точности обработки деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей // Транспортное машиностроение. 2023. № 2. С. 19–26. doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-19-26
2. Босинзон М. А. Современные системы с ЧПУ и их эксплуатация : учеб. пособие / под ред. Б. И. Черпакова. 4-е изд., стер. М. : Изд. центр «Академия», 2010. 192 с.
3. Мостовской М. В. Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схематехнического моделирования // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 8–13. doi: 10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13
4. Гусев Н. В. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 213 с.

5. Аксенов М. И. Моделирование электропривода : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2021. 135 с.
6. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схематехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1 (6). С. 22–26.
7. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0 : учеб. пособие. СПб. : Корона Принт, 2017. 320 с.
8. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В. Теоретическая оценка метрологических характеристик информационно-измерительных и управляющих систем электропривода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 5–16.
9. Слепцов В. В., Лукашкин В. Г., Гарипов В. К. [и др.]. Информационно-измерительные и управляющие системы лазерных технологических установок. Концепция проектирования. М. : МГУПИ, 2011. 104 с.

References

1. Makarov V.F., Pesin M.V., Norin A.O. Features of the use of multi-axis CNC grinding machines to improve productivity, quality and accuracy of machining parts and assemblies of aviation gas turbine engines. *Transportnoe mashinostroenie = Transport engineering*. 2023;(2):19–26. (In Russ.). doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-19-26
2. Bosinzon M.A. *Sovremennye sistemy s ChPU i ikh ekspluatatsiya: ucheb. posobie = Modern CNC systems and their operation: textbook*. 4th edition, stereotyped. Moscow: Izd. tsentr «Akademiya», 2010:192. (In Russ.)
3. Mostovskoy M.V. Adjustable electric drive for laser technological installations: assessment of metrological characteristics by the method of circuit modeling. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(2): 8–13. (In Russ.). doi: 10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13
4. Gusev N.V. *Sistemy tsifrovogo upravleniya mnogokoordinatnymi sledyashchimi elektroprivodami: ucheb. posobie = Digital control systems for multi-coordinate tracking electric drives: textbook*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhn. un-ta, 2010:213. (In Russ.)
5. Aksenov M.I. *Modelirovanie elektroprivoda: ucheb. posobie = Modeling of an electric drive: textbook*. Moscow: INFRA-M, 2021:135. (In Russ.)
6. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Methodology for assessing the metrological characteristics of an adjustable electric drive by the method of circuit modeling. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied metrology*. 2021;(1):22–26. (In Russ.)
7. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v Matlab 6.0: ucheb. posobie = Computer modeling of semiconductor systems in Matlab 6.0: textbook*. Saint-Petersburg: Korona Print, 2017:320. (In Russ.)
8. Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Orlov V.P., Artemova S.V. Theoretical assessment of the metrological characteristics of information-measuring and control systems of an electric drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(1):5–16. (In Russ.)
9. Sleptsov V.V., Lukashkin V.G., Garipov V.K. [et al.]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy lazernykh tekhnologicheskikh ustanovok. Kontseptsiya proektirovaniya = Information-measuring and control systems of laser technological installations. Design concept*. Moscow: MGUPI, 2011:104. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Владимирович Мостовской

старший преподаватель кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: mvmost@yandex.ru

Mikhail V. Mostovskoy

Lecturer of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Владимир Владимирович Слепцов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: vsleptsov@gmail.com

Vladimir V. Sleptsov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Семен Михайлович Лемешенко

аспирант,

МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)

E-mail: lemele1999@yandex.ru

Semen M. Lemeshchenko

Postgraduate student,

MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 07.04.2025

Принята к публикации/Accepted 12.05.2025

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЕЕ НАДЕЖНОСТИ

В. И. Мищенко¹, С. С. Верхушин²

^{1,2} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Применение многоканальной измерительной системы (ИС) наземного технологического оборудования по назначению предполагает реализацию измерительных процедур, выполнение и (или) управление выполнением измерений параметров систем ракет космического назначения и бортовой аппаратуры космических аппаратов на техническом и стартовом комплексах с оценкой их значений, с нормированной точностью, в связи с этим ИС отнесена к средствам измерений. *Материалы и методы.* Разработана модель процесса функционирования измерительного канала (ИК) многоканальной измерительной системы при ограниченной информации о ее надежности, позволяющая обеспечить обоснование параметров стратегии метрологического обслуживания, в частности интервал между поверками при гарантированной величине коэффициента готовности, и комплексно учесть влияние на надежность ИК ИС основных параметров, от которых она зависит. *Результаты и выводы.* Определено, что использование данной модели с применением аппарата континуального линейного программирования на этапе проектирования ИК ИС является одним из перспективных направлений обоснования величины интервала между поверками ИК ИС и расчета показателя эффективности функционирования ИС.

Ключевые слова: измерительный канал, многоканальная измерительная система, интервал между поверками, метрологическая надежность

Для цитирования: Мищенко В. И., Верхушин С. С. Модель процесса функционирования измерительного канала многоканальной измерительной системы при ограниченной информации о ее надежности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 16–22. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-2

A MODEL OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF A MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM OF GROUND-BASED TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH LIMITED INFORMATION ABOUT ITS RELIABILITY

V.I. Mishchenko¹, S.S. Verkhushin²

^{1,2} Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

^{1,2} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The use of a multi-channel measuring system (MS) for ground-based technological equipment for its intended purpose involves the implementation of measurement procedures, the execution and (or) control of measurements of the parameters of space-purpose rocket systems and onboard equipment of spacecraft at the technical and launch complexes, with the evaluation of their values and the required accuracy. Therefore, the IS is classified as a measuring instrument. *Materials and methods.* The article develops a model of the process of functioning of the measuring channel (MC) of a multichannel measuring system with limited information about its reliability, which makes it possible to provide justification for the parameters of the metrological service strategy, in particular, the interval between verifications with a guaranteed availability factor, and comprehensively take into account the impact on the reliability of the MS of the main parameters on which it depends. *Results and conclusions.* It is determined that the use of this model using the apparatus of continuous linear programming at the design stage of the MC MS is one of the promising directions for substantiating the interval between the MC MS checks and calculating the efficiency indicator of the MS.

Keywords: measuring channel, multi-channel measuring system, interval between verifications, metrological reliability

For citation: Mishchenko V.I., Verkhushin S.S. A model of the process of functioning of a multichannel measuring system of ground-based technological equipment with limited information about its reliability. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):16–22. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-2

Введение

Применение многоканальной измерительной системы наземного технологического оборудования (ИС) по назначению предполагает реализацию измерительных процедур, выполнение и (или) управление выполнением измерений параметров систем ракет космического назначения (РКН) и бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) на техническом и стартовом комплексах с оценкой их значений, с нормированной точностью, в связи с этим ИС отнесена к средствам измерений (СИ).

В соответствии с законом СИ, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, до ввода в эксплуатацию и после ремонта должны проходить первичную поверку, а в период эксплуатации – периодическую поверку¹. Поверку необходимо проводить через определенные интервалы времени, называемые интервалами между поверками (ИМП).

Интервал между поверками является одной из важных характеристик ИС, поскольку она определяет не только технические характеристики ИС, но и существенно влияет на своевременную готовность ракетно-космического комплекса (РКК). Поэтому требования к ИМП постоянно ужесточаются, что находит свое отражение в технических требованиях на вновь разрабатываемые и модернизируемые ИС. Так как ИС представляет собой набор измерительных каналов (ИК) измерений различных физических величин, которые предусматривают индивидуальный ИМП для каждого ИК, то в дальнейшем целесообразно будет определять ИМП для одного ИК.

На этапе утверждения типа СИ и для установления ИМП используются расчетные методы². Также в данных рекомендациях приведен ряд расчетов ИМП СИ, основанных на использовании показателей метрологической надежности, в том числе аналогом коэффициента метрологической исправности СИ является комплексный показатель надежности – коэффициент готовности, т.е. $K_{ми} \sim K_{г}$, что в свою очередь может быть применено и для ИК.

Наступление метрологического отказа может быть обнаружено только при поверке измерительных каналов ИС, результаты которой позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Является очевидным, что существует оптимальная величина ИМП, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие – могут привести к повышению погрешности измерений из-за метрологических отказов и, как следствие, к возникновению отказа в период проведения штатных работ ИС РКК. Действительно, частые поверки приводят к исключению ИК от использования их по назначению, снижают готовность РКК. Последнее обусловлено тем, что ИК, часто находясь на поверке, не может обеспечить контроль и оценку технического состояния РКН и это приводит к снижению коэффициента готовности ИК.

Редкие поверки приводят к тому, что в ИС накапливаются метрологические отказы, которые могут быть выявлены только при их поверке. И чем реже поверки, тем этих отказов больше. Накопление метрологических отказов приводит к тому, что после поверки ИС отправляются на ремонт. Это опять же приводит к снижению показателей готовности. Таким образом, можно предположить, что существует оптимальное значение ИМП, обеспечивающее максимум коэффициента готовности.

Другой не менее важной характеристикой при проведении поверки и определении ИМП является достоверность контроля, определяемая как показатель степени объективного отображения результатов контроля действительного технического состояния ИК. Количественно достоверность проведения поверки оценивается вероятностью ошибок первого (α) и второго (β)

¹ Об обеспечении единства измерений : федер. закон Российской Федерации № 102-ФЗ от 26.06.2008 // Российская газета. 2008. № 4697.

² РМГ 74–2004. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.

родов. Влияние этих ошибок существенно сказывается на эффективности функционирования современных ИК, созданных на элементной базе второго и третьего поколения, и особенно перспективных, разрабатываемых на элементной базе четвертого поколения. Это связано с возникновением неисправностей ИС, которые снижают эффективность ее функционирования, не приводя к полному отказу¹. А учет достоверности ИК ИС позволит выявить эти специфические метрологические отказы и таким образом поднять уровень готовности ИС.

Перспективным направлением для обоснования величины ИМП является использование моделей функционирования ИС в ходе их применения по назначению, позволяющих рассчитать их эффективность как функцию ИМП. При этом уровень сложности модели определяется не только перечнем учитываемых факторов, но и соответствующим наличием разнородных подсистем и элементов ИК.

При этом для определения ИМП разрабатываемой или проектируемой ИС с использованием разнородных подсистем и элементов ИК отсутствует статистическая информация об их неисправностях и отказах и, следовательно, отсутствует информация о законе распределения вероятностей наработки на отказ, а имеющаяся информация достаточна для определения оценок одного или двух моментов.

Следовательно, актуальной и в теоретическом, и в прикладном плане является задача разработки модели процесса функционирования ИК при ограниченной информации о ее надежности.

Разработка модели процесса функционирования ИК при ограниченной информации о ее надежности

В соответствии с работой [1] определено, что одним из перспективных направлений реализации моделирования процессов функционирования ИС является использование теории марковских и полумарковских процессов. Как показал анализ работ, посвященных моделированию процесса эксплуатации сложных технических систем [2–4], именно полумарковские модели позволяют комплексно обосновать периодичность контроля технического состояния технических систем. А наиболее адекватной для обоснования ИМП при ограниченной информации о надежности является модель, предложенная в работе [1]. Эта модель взята в качестве базовой. Также ее суть заключается в том, что контроль пригодности ИК, проводимый в рамках поверки, сводится к измерению, как правило, некоторого постоянного набора независимых параметров. По результатам поверки принимается решение об отнесении ИК к пригодному или непригодному состоянию. Обнаружение метрологических отказов, обусловивших непригодность ИК, осуществляется только при проведении поверки. Интервал между поверками ИК определяется как продолжительность временного промежутка T_{Π} , по истечении которого ИК поверяется в течение случайного времени $T_{\Pi\Pi}$ (продолжительности поверки). Своевременная поверка ИК обеспечивает требуемый уровень их пригодности к использованию по назначению. Чем выше уровень сложности ИК (соответственно, уровень избыточности), тем критичнее становятся принятые решения о годности ИК к достоверности полученных результатов.

При этом большое значение приобретает метрологическая исправность рабочего эталона. Поэтому при разработке модели процесса функционирования ИК ИС необходимо учитывать возможность снижения достоверности показаний ИК ИС в случае метрологического отказа рабочего эталона при проведении поверки ИК ИС.

Таким образом, при использовании ИС по назначению могут возникнуть следующие ситуации:

1. Перед началом проведения поверки ИК с вероятностью $1 - P_{\text{ИК}}(T_{\Pi})$ пригоден к использованию по назначению. В результате проведения поверки в течение времени $T_{\Pi\Pi}$ ИК можно принять следующие решения:

а) ИК пригоден (правильное решение) – с вероятностью $1 - \alpha$. После проведения поверки ИК ИС продолжает применяться по назначению до следующей поверки;

б) ИК непригоден (ошибочное решение, соответствующее ложной регистрации метрологической неисправности ИК, т.е. ошибке первого рода) с вероятностью α . В этом случае ИК

¹ ГОСТ 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

дополнительно перепроверяется в течение времени $T_{\text{дп}}$, что позволяет выявить достоверно отсутствие метрологического отказа.

2. До начала проведения поверки ИК с вероятностью $P_{\text{ик}}(T_{\text{п}})$ перешел в состояние непригодности. В результате проведения поверки о состоянии ИК могут быть приняты следующие решения:

а) ИК непригоден (правильное решение) – с вероятностью $1-\beta$. После обнаружения метрологического отказа ИК дополнительно перепроверяется в течение времени $T_{\text{дп}}$ и восстанавливается в течение среднего времени $T_{\text{в}}$;

б) ИК пригоден (пропуск отказа) – с вероятностью β . В этом случае ИК продолжает использоваться по назначению с метрологической неисправностью, снижающей эффективность функционирования ИС при использовании по назначению, до следующей поверки.

Граф, соответствующий этой модели, представлен на рис. 1. Предложенная модель процесса функционирования ИК учитывает основные факторы, влияющие на это функционирование, и позволяет определять основные показатели эффективности функционирования ИК при использовании по назначению.

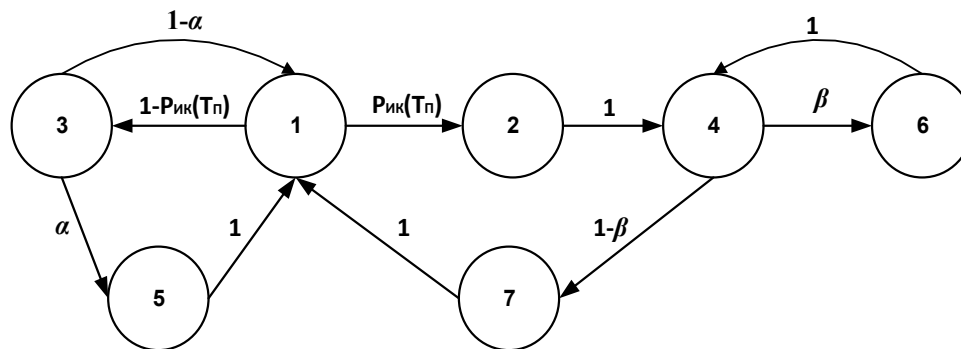


Рис. 1. Граф модели процесса функционирования ИК при использовании по назначению

Множество возможных состояний $R = \{1, 2, \dots, r\}$ включает 7 состояний (т.е. $r = 7$): R_1 – ИК пригоден и используется по назначению (исходное состояние); R_2 – ИК непригоден и функционирует с неисправностью, обусловившей непригодность, до начала контроля технического состояния; R_3 – ИК проверяется при условии, что он к началу проведения контроля технического состояния был исправен; R_4 – ИК проверяется при условии, что он к началу контроля технического состояния был неисправен; R_5 – ИК проходит дополнительную проверку при условии ложной регистрации неисправности; R_6 – ИК используется по назначению с неисправностью до очередного контроля технического состояния; R_7 – ИК проходит дополнительную проверку, подтверждающую ее неисправность, и восстанавливается.

Матрица переходных вероятностей $\mathbf{W}$ имеет вид

$$\mathbf{W} = \begin{vmatrix} 0 & P_{\text{ик}}(T_{\text{п}}) & 1-P_{\text{ик}}(T_{\text{п}}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 1-\beta \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Вероятность возникновения метрологического отказа ИК в течение периода между поверками $P_{\text{ик}}(T_{\text{п}})$ имеет вид

$$P_{\text{ИК}}(T_{\Pi}) = F_{\text{ИК}}(T_{\Pi}),$$

где $F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})$ – функция распределения безотказной работы ИК; T_{Π} – интервал между поверками ИК.

Ненулевые элементы матрицы условных функций распределения продолжительности пребывания в состояниях $F(t), F(t) = \{F_{ij}(t)\}, (i, j) = \overline{1, r}$ представлены ниже

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ \frac{F_{\text{ИК}}(t)}{F_{\text{ИК}}(t_{\Pi})}, & 0 < t < T_{\Pi}, \\ 1, & t \geq T_{\Pi}; \end{cases} \quad F_{24}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ 1 - \frac{F_{\text{ИК}}(T_{\Pi} - t)}{F_{\text{ИК}}(t_{\Pi})}, & 0 < t < T_{\Pi}, \\ 1, & t \geq T_{\Pi}; \end{cases}$$

$$F_{13}(t) = F_{64}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\Pi}, \\ 1, & t \geq T_{\Pi} \end{cases}; \quad F_{31}(t) = F_{35}(t) = F_{46}(t) = F_{47}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{ПП}}, \\ 1, & t \geq T_{\text{ПП}}; \end{cases}$$

$$F_{71}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{В}}, \\ 1, & t \geq T_{\text{В}} \end{cases}; \quad F_{51}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{ДП}}, \\ 1, & t \geq T_{\text{ДП}}. \end{cases}$$

В представленных формулах обозначены: T_{Π} – интервал между поверками ИК; $T_{\text{ПП}}$ – математическое ожидание продолжительности поверки ИК; $T_{\text{В}}$ – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК; $T_{\text{ДП}}$ – продолжительность дополнительной перепроверки в случае ошибки 1-го рода.

Математические ожидания пребывания процесса в состояниях имеют вид

$$m_1 = \frac{F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})}{1 - F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})}; \quad m_2 = \frac{T_{\Pi} - m_1}{P_{\text{ИК}}}; \quad m_3 = m_4 = T_{\text{ПП}};$$

$$m_5 = T_{\text{ДП}}; \quad m_6 = T_{\Pi}; \quad m_7 = T_{\text{В}}.$$

Таким образом, с учетом функции распределения времени безотказной работы ИК коэффициент готовности ИК определяется в соответствии с формулой

$$\begin{aligned} K_{\Gamma} &= \frac{\int_0^{T_{\Pi}} t dF_{\text{ИК}}(t)}{(T_{\Pi} + T_{\text{ПП}})(1 - F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})) + \frac{F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})}{1 - \beta} + (1 - F_{\text{ИК}}(T_{\Pi}))T_{\text{ДП}}\alpha + F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})T_{\text{В}}} = \\ &= \frac{\int_0^{T_{\Pi}} t dF_{\text{ИК}}(t)}{T_{\Pi} + T_{\text{ПП}} - F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})T_{\Pi} - F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})T_{\text{ПП}} + \frac{T_{\Pi}}{1 - \beta} F_{\text{ИК}}(T_{\Pi}) +} \\ &\rightarrow \frac{\frac{T_{\text{ПП}}}{1 - \beta} F_{\text{ИК}}(T_{\Pi}) + T_{\text{ДП}}\alpha - F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})T_{\text{ДП}}\alpha + F_{\text{ИК}}(T_{\Pi})T_{\text{В}}}{\int_0^{T_{\Pi}} t dF_{\text{ИК}}(t)} = \\ &= \frac{\int_0^{T_{\Pi}} t dF_{\text{ИК}}(t)}{T_{\Pi} + T_{\text{ПП}} + T_{\text{ДП}}\alpha - F_{\text{ИК}}(T_{\Pi}) \left(T_{\Pi} + T_{\text{ПП}} - \frac{T_{\Pi} + T_{\text{ПП}}}{1 - \beta} + T_{\text{ДП}}\alpha - T_{\text{В}} \right)}. \end{aligned}$$

С учетом того, что $\int_0^{T_{\Pi}} t dF_{\text{ИК}}(t) = \int_0^{T_{\Pi}} t f(t) dt$ и $F_{\text{ИК}}(T_{\Pi}) = \int_0^{T_{\Pi}} f(t) dt$, то коэффициент готовности

ИК примет вид

$$K_{\Gamma} = \frac{\int_0^{T_{\Pi}} tf(t)dt}{T_{\Pi} + T_{\text{III}} + \alpha T_{\text{дп}} - \int_0^{T_{\Pi}} f(t)dt \left(T_{\Pi} + T_{\text{III}} - \frac{T_{\Pi} + T_{\text{III}}}{1-\beta} + T_{\text{дп}}\alpha - T_{\text{в}} \right)}, \quad (1)$$

где T_{Π} – интервал между поверками ИК; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК; $T_{\text{в}}$ – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК; $T_{\text{дп}}$ – продолжительность повторной проверки в случае ошибки 1-го рода; α, β – вероятности возникновения ошибок контроля I и II рода; $f(t)$ – плотность распределения метрологических отказов ИК.

Как видно из выражения (1), коэффициент готовности ИК зависит от плотности распределения вероятности метрологических отказов. Плотность распределения вероятности метрологических отказов ИК определяется на основании оценок моментов распределения отказов (математического ожидания μ_1 и дисперсии μ_2). При этом вся информация о функции распределения вероятностей моментов отказов $F(t)$ содержится в выражении $F(t) \in \Omega(\mu_1, \mu_2)$, где $\Omega(\mu_1, \mu_2)$ – множество функций распределения положительных случайных величин.

Для решения данной задачи при имеющейся информации об оценках моментов необходимо применить математический аппарат континуального линейного программирования (КЛП). Этот аппарат позволяет отыскивать неизвестные функции, в том числе плотность распределения вероятности метрологических отказов, оптимизирующий функционал (коэффициент готовности), т.е. нахождение такой плотности распределения вероятности метрологических отказов ИК, которая минимизирует коэффициент готовности и удовлетворяет некоторым ограничениям. Теория и математические методы для решения задач аппаратом КЛП хорошо отработаны и находят широкое применение [5]. Такой подход обеспечивает обоснование ИМП ИК для требуемой величины коэффициента готовности.

Заключение

Представленная модель процесса функционирования ИК при ограниченной информации о надежности отличается от известных тем, что использует новый подход расчета коэффициента готовности, который комплексно учитывает влияние основных параметров процесса функционирования: периодичности поверки, продолжительности проведения поверки, продолжительности повторной перепроверки, продолжительности восстановления и вероятностей возникновения ошибок I и II рода. Данная модель позволяет обосновать оптимальную величину ИМП ИК, которая обеспечивает требуемое значение коэффициента готовности.

Особенностью предложенной модели является использование в расчетах функции распределения безотказной работы ИК, и в дальнейшем плотности распределения вероятности метрологических отказов, которая определяется на основании оценок моментов распределения отказов.

В дальнейших исследованиях необходимо разработать методику определения ИМП ИС при ограниченной информации о надежности учитывающей ИМП каждого ИК.

Представленная в статье модель имеет наряду с теоретическим значением и прикладную значимость, а именно позволит повысить результативность и достоверность измерений при выполнении технологических операций по подготовке и пуску РКН за счет использования оптимального ИМП ИК. Прикладной аспект полученных результатов заключается в том, что проблема обеспечения надежности систем РКН приобретает большую актуальность и значимость в связи с наращиванием орбитальной группировки КА.

Список литературы

1. Верхушин С. С., Мищенко В. И., Мищенко И. В., Исаков К. Н. Выбор прототипа модели процесса функционирования измерительного канала многоканальной измерительной системы для расчета ее коэффициента готовности при ограниченной информации о надежности // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 30–39. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-4
2. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.

3. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьянин день, 1993. 274 с.
4. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 218 с.
5. Раскин Л. Г., Кириченко И. О. Континуальное линейное программирование. Харьков : Военный институт ВВ МВС, 2005. 176 с.

References

1. Verkhushin S.S., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V., Isakov K.N. Selection of a prototype model of the process of functioning of the measuring channel of a multichannel measuring system for calculating its availability coefficient with limited information about reliability. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2024;(4):30–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-4
2. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiy letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)
3. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of radio electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
4. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem = Problems of operation of complex technical systems*. Saint-Petersburg: Politehnika-servis, 2016:218. (In Russ.)
5. Raskin L.G., Kirichenko I.O. *Kontinual'noe lineynoe programmirovaniye = Continuous linear programming*. Kharkov: Voennyi institut VV MVS, 2005:176. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Ильич Мищенко

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры метрологического обеспечения
вооружения военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Vladimir I. Mishchenko

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of metrological
support of weapons, military and special equipment,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Сергей Сергеевич Верхушин

адъюнкт,
кафедра метрологического обеспечения вооружения
военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Sergey S. Verkhushin

Adjunct,
sub-department of metrological support of weapons,
military and special equipment,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 07.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.04.2025

Принята к публикации / Accepted 12.05.2025

УДК 389.14
doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-3

МЕТОДИКА АДАПТАЦИИ СРОКА СЛУЖБЫ И ПАРАМЕТРОВ СТРАТЕГИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МОБИЛЬНОГО МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА К УРОВНЮ ЕГО НАДЕЖНОСТИ

Е. А. Михайлов¹, В. И. Мищенко²

^{1,2} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
^{1,2} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Существующие в настоящее время сроки службы мобильных метрологических комплексов в большинстве случаев не имеют под собой серьезного технического обоснования и являются отражением давно установленных в законодательном порядке обобщенных норм амортизационных отчислений на полное восстановление оборудования. Поэтому они могут и должны рассматриваться как граничный срок, при достижении которого должна быть объективно оценена возможность дальнейшей эксплуатации мобильных метрологических комплексов. *Материалы и методы.* Представлена методика адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности. *Результаты и выводы.* Данная методика позволяет рассчитать такой срок службы, который обеспечивает требуемое значение коэффициента готовности мобильного метрологического комплекса.

Ключевые слова: метрологические комплексы, срок службы, стратегия метрологического обслуживания, полумарковский процесс, поверочная интенсивность метрологических отказов

Для цитирования: Михайлов Е. А., Мищенко В. И. Методика адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 23–28. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-3

METHOD OF ADAPTATION OF THE SERVICE LIFE AND PARAMETERS OF THE METROLOGICAL MAINTENANCE STRATEGY OF A MOBILE METROLOGICAL COMPLEX TO THE LEVEL

E.A. Mikhaylov¹, V.I. Mishchenko²

^{1,2} Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
^{1,2} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The current service life of mobile metrological complexes in most cases does not have a serious technical justification and is a reflection of the generalized norms of depreciation charges for the complete restoration of equipment that have long been established by law. Therefore, they can and should be considered as a deadline, upon reaching which the possibility of further operation of the mobile metrological complexes should be objectively assessed. *Materials and methods.* The article presents a method for adapting the service life and parameters of the metrological maintenance strategy of a mobile metrological complex to its reliability level. *Results and conclusions.* This method allows calculating such a service life that ensures the required value of the readiness factor of the mobile metrological complex.

Keywords: metrological complexes, service life, metrological maintenance strategy, semi-Markov process, verification intensity of metrological failures

For citation: Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I. Method of adaptation of the service life and parameters of the metrological maintenance strategy of a mobile metrological complex to the level. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):23–28. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-3

Введение

Существующие в настоящее время сроки службы мобильных метрологических комплексов (ММК) в большинстве случаев не имеют под собой серьезного технического обоснования и являются отражением давно установленных в законодательном порядке обобщенных норм

амортизационных отчислений на полное восстановление оборудования. Поэтому они могут и должны рассматриваться как граничный срок, при достижении которого должна быть объективно оценена возможность дальнейшей эксплуатации ММК.

Срок службы ММК является важным аспектом, определяющим его эффективность и надежность в процессе обеспечения точности измерений. ММК, как правило, состоят из различных измерительных приборов и систем, которые должны функционировать в течение определенного времени, обеспечивая стабильность и достоверность результатов. Важно отметить, что срок службы ММК не является фиксированным значением, а зависит от множества факторов, включая качество используемых материалов, технологии производства, условия эксплуатации и регулярность метрологического обслуживания.

Решение задачи адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания (периодичности и продолжительности проведения аттестаций (поверок), проводимых в рамках всех вариантов метрологического обслуживания), обеспечивающей требуемый уровень готовности ММК, является актуальным и востребованным.

Анализ функционирования ММК и эксплуатационной документации на них показывает, что характерной особенностью его обслуживания является то, что оно сводится к двум мероприятиям, а именно: проведению ежедневного технического обслуживания (ЕТО) и проведению метрологического обслуживания. ЕТО – это как правило чистка, проверка на включение/выключение, протирка и пылеудаление, а метрологическое обслуживание – это аттестация эталонов и поверка средств измерений, входящих в рабочие места ММК и их ремонт. В то же время ММК по своим признакам является сложной системой со всеми соответствующими таким объектам свойствами.

Решение задачи адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности

Решение задачи адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания ММК к уровню надежности включает в себя решение следующих подзадач:

- 1) формирование множества значений срока службы;
- 2) формирование вариантов распределения аттестации (поверки) Э (СИ) по видам и периодам метрологического обслуживания для каждого значения срока службы;
- 3) расчет коэффициента готовности для каждого варианта и выбор максимального;
- 4) в случае превышения максимального значения коэффициента готовности, превышающего требуемое значение, выбирается следующее значение.

Решение вышеперечисленных подзадач осуществляется с помощью предлагаемой методики адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания мобильного метрологического комплекса к уровню его надежности, которая включает пять этапов [1, 2].

Первый этап – учет особенностей функционирования и структуры исследуемого ММК.

Выделим в исследуемом метрологическом комплексе:

1) $(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_L)$ – совокупность Э (СИ), готовность каждого из которых дает возможность судить о готовности всего ММК к выполнению возложенных на него функциональных задач, $i = \overline{1, L}$;

2) $(\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_L)$ – совокупность интенсивностей метрологических отказов i -го Э (СИ), указанных в формулярах на Э (СИ) ММК. Далее необходимо проранжировать совокупность интенсивностей метрологических отказов i -го Э (СИ) по убыванию.

Второй этап – подготовка исходных данных для расчета среднего времени пребывания Э (СИ) в работоспособном состоянии.

Введем булевы переменные:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й Э (СИ) добавляется к числу поверяемых,} \\ & \text{при } k\text{-м виде метрологического обслуживания, } i = \overline{1, L}, k = \overline{1, N}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где N – количество видов метрологического обслуживания.

Совокупность $\{x_{ik}\}$ образует матрицу назначений X .

Аналогично вышесказанному введем также понятие поверочной интенсивности метрологических отказов при проведении различных видов метрологического обслуживания k -го вида, которая рассчитывается через интенсивности метрологических отказов эталонов по формуле

$$\Lambda_k = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{ik}. \quad (1)$$

Производится вычисление по формуле (1) для каждого вида метрологического обслуживания:

$\Lambda_1 = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{i1} = L\lambda_1$ – интенсивность обнаружения отказов при проведении метрологического обслуживания 1-го вида (ЕТО);

$\Lambda_2 = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{i2}$ – интенсивность обнаружения отказов при проведении метрологического обслуживания 2-го вида, но не обнаруживаемых при проведении предыдущего метрологического обслуживания;

$\Lambda_N = \sum_{i=1}^L \lambda_i x_{iN}$ – интенсивность обнаружения отказов при проведении метрологического обслуживания N -го вида, но не обнаруживаемых при проведении всех предыдущих видов метрологического обслуживания.

Допустим, что периодичность каждого из видов метрологического обслуживания с большей полнотой является кратной периодичности проведения метрологического обслуживания аттестации (поверки) Э (СИ).

$(T_1, T_2, \dots, T_N)$ – совокупность периодов проведения метрологического обслуживания для различных по полноте видов метрологического обслуживания;

$(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$ – совокупность коэффициентов, устанавливающих соотношение между периодами соседних видов метрологического обслуживания, т.е.

$$Z_1 = \frac{T_2}{T_1}; Z_2 = \frac{T_3}{T_2}; \dots; Z_k = \frac{T_{k+1}}{T_k}; \dots; Z_{N-1} = \frac{T_N}{T_{N-1}}; Z_N = \frac{T_{\text{сп}}}{T_N}. \quad (2)$$

Третий этап – расчет коэффициента готовности ММК.

Рассчитаем значение коэффициента готовности для различных вариантов метрологического обслуживания, отличающихся периодичностью, объемом, сроком службы, и выберем вариант, имеющий наибольшее значение коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma} = \max_{Z, X, N, T_{\text{сп}}} K_{\Gamma}(Z, X, N, T_{\text{сп}}).$$

Рассмотрим безотказность ММК на временном интервале между соседними аттестациями (проверками) Э (СИ) 1-го вида метрологического обслуживания

$$[T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1}; T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1}], \quad (3)$$

где $T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1} = (l_N - 1)T_N + (l_{N-1} - 1)T_{N-1} + \dots + (l_k - 1)T_k + \dots + (l_1 - 1)T_1 = \sum_{k=1}^N (l_k - 1)T_k$ – момент времени, соответствующий окончанию l_1 -го метрологического обслуживания 1-го вида при условии, что до этого момента проведено l_2 метрологического обслуживания 2-го вида, ..., l_N метрологического обслуживания N -го вида;

$$T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1} = T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1} + T_1 = T_1 + \sum_{k=1}^N (l_k - 1)T_k; \quad (4)$$

– момент времени, соответствующий окончанию следующего $(l_1 + 1)$ -го по счету метрологического обслуживания 1-го вида.

С учетом коэффициентов (2) имеем

$$T_k = T_1 \prod_{S=1}^{k-1} Z_S, T_N = \frac{T_{\text{сп}}}{Z_N}, Z_N = \frac{T_{\text{сп}}}{T_1 \prod_{S=1}^{N-1} Z_S}. \quad (5)$$

Тогда с использованием соотношений (3)–(5) получим

$$T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1} = T_1^\Pi \sum_{k=1}^N (l_k - 1) \prod_{S=1}^{k-1} Z_S;$$

$$T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1} = T_1^\Pi \left[1 + \sum_{k=1}^N (l_k - 1) \prod_{S=1}^{k-1} Z_S \right]. \quad (6)$$

Определим вероятность безотказной работы эталонов и средств измерений ММК на интервале $[T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1}^\Pi; T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_1 + 1}^\Pi]$. Для этапа нормальной эксплуатации (экспоненциальное распределение времени безотказной работы) имеем

$$P(T_{N,1}^\Pi; T_{N,1+1}^\Pi) = \exp[-\Lambda_N (T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,N}^\Pi)] \times \exp[-\Lambda_{N-1} (T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,1-1}^\Pi)] \times \dots$$

$$\times \exp[-\Lambda_k (T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,k}^\Pi)] \times \exp[-\Lambda_2 (T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,2}^\Pi)] \times \dots$$

$$\times \exp[-\Lambda_1 (T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,1}^\Pi)] = \exp\left[-\sum_{k=1}^N \Lambda_k (T_{N,1+1}^\Pi - T_{N,k}^\Pi)\right],$$

где

$$T_{N,1+1}^\Pi = T_1^\Pi \left\{ 1 + \sum_{m=1}^N \left[(l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right] \right\};$$

$$T_{N,k}^\Pi = T_{l_N, l_{N-1}, \dots, l_k} = T_1^\Pi \sum_{m=1}^N \left[(l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right], k = (1, \dots, N). \quad (7)$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы на произвольном интервале между метрологическим обслуживанием 1-го вида

$$P_a(T_1^\Pi) = \exp(-\Lambda_1 T_1^\Pi) \exp(-\Lambda_2 T_1^\Pi (1 + (l_1 - 1)Z_1)) \times$$

$$\times \exp(-\Lambda_i T_1^\Pi (1 + (l_1 - 1)Z_1 + (l_2 - 1)Z_1 Z_2)) \times \dots$$

$$\times \exp\left\{-\Lambda_i T_1^\Pi \left[1 + (l_1 - 1)Z_1 + (l_2 - 1)Z_1 Z_2 + \dots + (l_N - 1) \prod_{S=1}^N Z_S \right]\right\} =$$

$$= \exp\left\{-T_1^\Pi \sum_{k=1}^N \left[\sum_{i=1}^L \lambda_i x_{ik} \left(1 + \sum_{m=1}^k (l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right) \right]\right\}. \quad (8)$$

Соответственно, вероятность возникновения отказа ММК равна

$$\overline{P_a(T_1)} = 1 - P_a(T_1).$$

Используя выражения (1) – (8), а также соотношение для коэффициента готовности, полученное в работах [3–5], определим наборы $\{x_{jk}\}$ и $\{Z_k\}$, $j = (1, \dots, L)$, $k = (1, \dots, N)$, которые обеспечивали бы наибольшую величину коэффициента готовности ММК в течение всего срока службы $T_{\text{сл}}$ в соответствии с выражением

$$K_\Gamma = \max_{Z, X, N, T_{\text{сл}}} \frac{T_p(Z, X, N, T_{\text{сл}})}{T_{\text{сл}}} = \frac{1}{T_{\text{сл}}} \max_{Z, X, N, T_{\text{сл}}} \{T_p(Z, X, N, T_{\text{сл}})\}, \quad (9)$$

где

$$T_p(Z, X, N, T_{\text{сл}}) = T_1 \sum_{l_N=1}^{Z_N} \sum_{l_{N-1}=1}^{Z_{N-1}} \dots \sum_{l_1=1}^{Z_1} \frac{1 - P_a(T_1^\Pi)}{A},$$

$$A = (T_1^\Pi + T_m^{\text{III}})(P_a(T_1^\Pi) + \overline{P_a}(T_1^\Pi) / D_m) + F T_{pk} P_a(T_1^\Pi) - \overline{P_a}(T_1^\Pi) T_B;$$

$$P_a(T_1^\Pi) = \exp\left\{-T_1^\Pi \sum_{k=1}^N \left[\sum_{i=1}^L \lambda_i x_{ik} \left(1 + \sum_{m=1}^k (l_m - 1) \prod_{S=1}^m Z_S \right) \right]\right\}; \quad (10)$$

– среднее время пребывания ММК в работоспособном состоянии; $P_a(T_1^{\Pi})$ – вероятность безотказной работы ММК на интервале между соседними метрологическими обслуживаниями 1-го вида

$$T_m^{\Pi\Pi} = \sum_{i=1}^L T_i x_{im}; \quad (11)$$

– продолжительность метрологического обслуживания ММК при m -м виде метрологического обслуживания, где $m = (1, \dots, N)$ – вероятность обнаружения отказа ММК при m -м виде метрологического обслуживания:

$$\beta_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L \lambda_i x_{im}}{\sum_{i=1}^L \lambda_i}. \quad (12)$$

Оптимизация целевой функции (10) производится с учетом ряда естественных ограничений:

$$1. \sum_{k=1}^N x_{ik} = 1, i = (1, \dots, L). \quad (13)$$

Это ограничение учитывает требования обязательной поверки каждого Э (СИ) при каком-либо из видов метрологического обслуживания.

$$2. \sum_{k=1}^N x_{ik} \geq 1, k = (1, \dots, N). \quad (14)$$

Это ограничение означает, что при каждом виде метрологического обслуживания для поверки должен включаться хотя бы один из ранее не поверявшихся Э (СИ).

$$3. \sum_{i=1}^L T_i x_{ik} \leq T_{TP}^{\Pi\Pi}. \quad (15)$$

Это ограничение обусловлено тем, что продолжительность метрологического обслуживания регламентируется условиями проведения поверки.

$$4. Z_S > 0 - \text{целое.}$$

Решение этой сложной оптимизационной функции может быть получено при использовании метода поэтапной последовательной максимизации среднего времени пребывания в работоспособном состоянии и фиксированном значении срока службы, суть которого состоит в следующем. Вначале фиксируется число видов метрологического обслуживания. Далее в качестве начальной совокупности периодов обслуживания используется набор Э (СИ), реализуемый на практике для большинства ММК. При фиксированных $N, T_{\text{сл}}, Z$ осуществляется распределение аттестаций (поверок) Э (СИ) по видам метрологического обслуживания. Процедура является итерационной. Вначале обнуляется матрица $\{x_{ik}\}, k = (1, \dots, N), i = (1, \dots, L)$. На первом шаге присваивается значение единицы всем элементам первой строки, соответствующей первому виду метрологического обслуживания, т.е. $x_{i1} = 1, i = (1, \dots, L)$. На втором и последующих шагах последовательно присваивается значение единицы элементам матрицы $x_{i+1,k+1}, k = (1, \dots, N), i = (1, \dots, L)$, что соответствует перераспределению аттестаций (проверок) Э (СИ) по видам метрологического обслуживания и вычисляются приращения $\Delta T_p(x_{i1})$ целевой функции (9). Перераспределение аттестаций (проверок) продолжается до тех пор, пока $\Delta T_p(x_{i1}) > 0$. Здесь же производится вычисление значений коэффициента готовности K_G , его приращений ΔK_G , вариантов распределения аттестаций (поверок) Э (СИ) по видам метрологического обслуживания [6].

Процедура заканчивается при выполнении ограничений (13) и (14). После этого проверяется выполнение остальных ограничений (15).

Четвертый этап – отыскание рациональных значений $X, Z, N, T_{\text{сл}}$ по максимуму коэффициента готовности (9).

Пятый этап – в случае превышения максимального значения коэффициента готовности выбирается требуемое значение срока службы.

Расчет значения коэффициента готовности прекращается, когда наибольшее значение K_G как функции количества, видов, периодичности и объема метрологического обслуживания становится меньше требуемого. Тогда срок службы выбирается равным величине, полученной на предыдущем шаге.

Заключение

В данной статье представлена методика адаптации срока службы и параметров стратегии метрологического обслуживания ММК к уровню его надежности, оцениваемому коэффициентом готовности. Данная методика позволяет рассчитать такой срок службы ММК, который обеспечивает его требуемое значение коэффициента готовности.

Список литературы

1. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника сервис, 2016. 218 с.
2. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Гончаров А. П., Ткаченко П. А. Методика обоснования стратегии технического обслуживания мобильного метрологического комплекса на базе одномерной много-ярусной полумарковской модели // Вестник метролога. 2023. № 2. С. 12–17.
3. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Мищенко И. В. Полумарковская модель процесса функционирования средств измерений // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 29–38. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
4. Мищенко В. И., Кравцов А. Н., Мамлеев Т. Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учетом периодичности поверки // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 22–27.
5. Шуенкин В. А., Донченко В. С. Прикладные модели теории массового обслуживания. Киев : НМК ВО, 1992. 398 с.
6. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.

References

1. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problematics of operation of complex technical systems*. Saint-Petersburg: Politekhnik servis, 2016:218. (In Russ.)
2. Efremov V.A., Mishchenko V.I., Goncharov A.P., Tkachenko P.A. Methodology for substantiating the strategy of maintenance of a mobile metrological complex based on a one-dimensional multi-tiered semi-Markov model. *Vestnik metrologa = Bulletin of the Metrologist*. 2023;(2):12–17. (In Russ.)
3. Efremov V.A., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V. The semi-Markov model of the process of functioning of measuring instruments. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):29–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
4. Mishchenko V.I., Kravtsov A.N., Mamleev T.F. A semi-Markov model of the functioning of redundant measuring instruments, taking into account the frequency of verification. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2021;(4):22–27. (In Russ.)
5. Shuenkin V.A., Donchenko V.S. *Prikladnye modeli teorii massovogo obsluzhivaniya = Applied models of queueing theory*. Kiev: NMK VO, 1992:398. (In Russ.)
6. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiey letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Александрович Михайлов

адъюнкт,
кафедра метрологического обеспечения
вооружения военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Evgeny A. Michaylov

Adjunct,
sub-department of metrological support of weapons,
military and special equipment,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Владимир Ильич Мищенко

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры метрологического обеспечения
вооружения военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Vladimir I. Mishchenko

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of metrological
support of weapons, military and special equipment,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 04.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.04.2025

Принята к публикации / Accepted 12.05.2025

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ ЛИЧНОГО СОСТАВА ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ МАЛОГАБАРИТНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ И ДИВЕРСИОННЫХ ГРУПП

А. И. Годунов¹, М. В. Ерофеев², А. Г. Избасов³, А. М. Мухамбетов⁴, П. Д. Головин⁵

^{1,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

^{3,4} Военный институт сил воздушной обороны Республики Казахстан, Актобе, Республика Казахстан

¹ Godunov@pnzgu.ru, ² penza.vamto@mil.ru, ³ iag1973@mail.ru, ⁴ suimbayeva@internet.ru, ⁵ GPD75@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные малогабаритные беспилотные летательные аппараты (МБЛА) выполняют разнообразные задачи, такие как наблюдение, целеуказание, нанесение ударов, транспортировка грузов и т.д., а также применяются в террористических и диверсионных целях. Вместе с комплектацией современных подразделений борьбы с террористическими и диверсионными группами принципиально новым вооружением и военной техникой увеличиваются требования к навыкам операторов в борьбе с МБЛА. *Материалы и методы.* Исследование посвящено вопросам подготовки операторов в борьбе с МБЛА на основе применения существующих тренажеров по стрельбе из стрелкового оружия и средств ближнего боя. Постоянное практическое использование штатного оружия приводит к интенсивному его износу, но использование тренажеров, которые приближены к оригиналу, снимает эту проблему, так как обеспечивает необходимый уровень подготовки оператора в борьбе с МБЛА террористических и диверсионных групп. *Результаты и выводы.* Даются рекомендации по использованию электронных и интерактивных лазерных тиров, которые не требуют физического контакта с мишенью, так как они используют лазерные лучи для регистрации попаданий, что делает их более удобными в использовании и позволяет более точно отслеживать результаты стрельбы. Применение интерактивных лазерных тиров с изменением сценариев стрельбы по МБЛА террористических и диверсионных групп повысит их навык и компетенцию.

Ключевые слова: МБЛА, технические средства обучения, тренажеры, обучение

Для цитирования: Годунов А. И., Ерофеев М. В., Избасов А. Г., Мухамбетов А. М., Головин П. Д. Методы и технические средства обучения личного состава противодействию малогабаритным беспилотным летательным аппаратам террористических и диверсионных групп // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 29–36. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-4

METHODS AND TECHNICAL MEANS OF TRAINING COUNTERING SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL VEHICLES OF TERRORIST AND SABOTAGE GROUPS

A.I. Godunov¹, M.V. Erofeev², A.G. Izbasov³, A.M. Mukhambetov⁴, P.D. Golovin⁵

^{1,5} Penza State University, Penza, Russia

² Branch of the Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

^{3,4} Military Institute of the Air Defense Forces of the Republic of Kazakhstan, Aktobe, Republic of Kazakhstan

¹ Godunov@pnzgu.ru, ² penza.vamto@mil.ru, ³ iag1973@mail.ru, ⁴ suimbayeva@internet.ru, ⁵ GPD75@yandex.ru

Abstract. *Background.* Modern small unmanned aerial vehicles (MBLA) perform a variety of tasks, such as surveillance, target designation, striking, cargo transportation, etc., and are also used for terrorist and sabotage purposes. Together with the equipment of modern units for combating terrorist and sabotage groups with fundamentally new weapons and military equipment, the requirements for the skills of operators in the fight against MBLA are increasing. *Materials and methods.* The study is devoted to the training of operators in the fight against MBLA based on the use of existing simulators for shooting from small arms and close combat means. Constant practical use of standard weapons leads to intensive wear and tear, but the use of simulators that are close to the original removes this problem, since they provide

the necessary level of operator training in the fight against MBLA of terrorist and sabotage groups. *Results and conclusions.* The article provides recommendations for the use of electronic and interactive laser shooting ranges that do not require physical contact with the target, as they use laser beams to record hits, which makes them more convenient to use and allows you to more accurately track shooting results. The use of interactive laser shooting ranges with changing scenarios for firing at MBLAs of terrorist and sabotage groups will increase their skill and competence.

Keywords: MBLA, technical means of training, simulators, training

For citation: Godunov A.I., Erofeev M.V., Izbasov A.G., Mukhambetov A.M., Golovin P.D. Methods and technical means of training countering small-sized unmanned aerial vehicles of terrorist and sabotage groups. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):29–36. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-4

Применение МБЛА в военных, террористических и диверсионных целях ставит новые квалификационные требования к навыкам операторов в борьбе с МБЛА. На сегодня существует большое количество методов и технических средств в противодействии МБЛА [1–4], но отсутствуют методы и технические средства обучения личного состава противодействию МБЛА террористических и диверсионных групп.

«Принципы обучения – это руководящие положения, определяющие ход обучения в соответствии с целями воинского воспитания и раскрывающие закономерности процесса усвоения знаний, формирования умений и навыков у обучаемых» [5].

«Обучение военнослужащих – педагогический процесс, в ходе которого под руководством командира (начальника) подчиненные приобретают необходимые знания, умения и навыки, из чего в конечном счете формируется воинское мастерство» [5].

«Знания – закрепленные в памяти различные сведения в виде систематизированных понятий и образов. Знания выражаются в правилах, законах, научных теориях. Процесс овладения знаниями завершается их применением на практике. В бою мало знать, как надо действовать. В военное время боевое слаживание необходимо, на основе этих знаний надо уметь действовать. На основе усвоения знаний у личного состава в процессе специальных упражнений развиваются необходимые умения и навыки» [5].

«Умения – способность обучаемых применить знания и навыки на практике для быстрого, точного и сознательного выполнения своих обязанностей. В процессе их формирования личный состав переходит от работы с посторонней помощью к самостоятельной работе. В ходе постоянных упражнений умения совершенствуются, а их отдельные элементы превращаются в навыки. Однако умения не сводятся к сумме навыков, в них всегда есть элементы творчества, которые позволяют солдату умело действовать в различной обстановке, исключают шаблон и натаскивание. На формирование их направлена вся полевая выучка личного состава» [5].

«Навыки – автоматически выполняемые действия, представляющие собой составную часть сознательной деятельности человека. Навыки в процессе деятельности как бы высвобождают сознание и волю воина от излишней распыленности и дают ему возможность сосредоточиться на решении основной задачи» [5].

«Необходимый уровень подготовки обучающихся можно обеспечить только при условии проведения плановых занятий и стрелковых тренировок с использованием штатного оружия. Однако интенсивное его использование в процессе обучения приводит к преждевременному износу, поломкам и, как следствие, влечет за собой значительные временные и материальные затраты на ремонт, восстановление и техническое обслуживание. Кроме того, при действиях с боевым оружием не всегда представляется возможным своевременно выявить индивидуальные ошибки обучающихся и определить пути их устранения» [6].

Таким образом, проанализировав существующие методы и технические средства по противодействию МБЛА, требования к личному составу по вопросам обучения противодействию МБЛА террористических и диверсионных групп, с возможностью изменения сценариев стрельбы по МБЛА, с целью повышения навыков и компетенций личного состава установлена необходимость использования учебно-тренировочных симуляторов и технических средств.

Анализ учебно-тренировочных симуляторов и технических средств показал, что они в основном создают визуальное представление процесса поражения цели из средств ближнего боя. К учебно-тренировочным симуляторам и техническим средствам в основном принадлежат компьютерные симуляторы, обеспечивающие тренировку полетов на МБЛА (для тренировки противодействия МБЛА террористических и диверсионных групп с помощью МБЛА-истребителей –

самолетного типа либо FPV-дроны – МБЛА ПВО), тренажеры, созданные на основе использования оптико-электронных систем, технические средства для тренировки стрельбы из РПГ и другие устройства для специального обучения личного состава.

Технические средства имеют положительные стороны:

- допустимость получения результатов стрельбы сразу же, а также помощь в разборе точности стрельбы;
- разнообразие фоновой обстановки, имитирующей реальные условия даже в 3D-формате современных боевых действий;
- 3D-графика, позволяющая самостоятельно создавать разную ситуацию и личный сценарий боевых действий, что приближает обучающегося к получению максимальных навыков использования средств ближнего боя в различных условиях их применения;
- уменьшение времени в получении компетенции по использованию средств ближнего боя и МБЛА благодаря исключению из учебного плана перемещения в полевые учебные центры и стрельбища для тренировки.

Наилучшее применение учебно-тренировочных симуляторов и технических средств предлагается в начале подготовки личного состава (оператора), во время которого обучающиеся приобретают навыки применения средств ближнего боя и МБЛА.

«Современный стрелковый тренажер – это сложное многофункциональное электронное устройство, используемое совместно с персональным компьютером, позволяющее имитировать процесс выстрела из оружия без применения боеприпасов. Основной задачей, которую решают разработчики стрелковых тренажеров, является достижение как можно более высокой степени приближения условий тренировки к реальным условиям» [6].

В настоящее время все стрелковые тренажеры делятся на следующие виды: «стрелок–мишень» и «стрелок–стрелок», схематично приведенные на рис. 1.



Рис. 1. Основные группы стрелковых тренажеров

В чем же разница использования основных групп стрелковых тренажеров между собой. В первом случае «стрелок–мишень» создает симуляцию применения средств ближнего боя по мишени, расположенной на определенном расстоянии согласно документам и правилам стрельбы. Как правило, учебно-тренировочные симуляторы и технические средства вида «стрелок–мишень» состоят из макета средства ближнего боя (либо реального средства ближнего боя), которое оснащено системой звуковой имитации выстрела и отдачи. Лучше всего использовать оружие личного состава, с которым он будет вести боевые действия, но это завершающий этап обучения личного состава в подготовке к противодействию МБЛА террористических и диверсионных групп. Второй случай «стрелок–стрелок» отличается от первого тем, что личный состав тренируется использовать личное оружие против противника в условиях, приближенных к боевым действиям, как в игре для детей с элементами лазер-шоу, когда участники используют излучатели в оптическом диапазоне электромагнитных волн, размещенные на стволах оружия, а форма оборудована приемниками оптического излучения, при попадании которого срабатывают световые диоды – демонстрирующие попадание.

Учебно-тренировочные симуляторы и технические средства вида «стрелок–мишень» характеризуются точностью попадания в мишень (щит, цель, мета) с цифрами, позволяющими определить точность попадания. При стрельбе в реальных условиях на точность попадания влияют не только физические показатели, такие как прицеливание с правильным (удобным) хватом, плавность спуска пальцем, но и психофизиологические характеристики, которые зависят от опыта ведения боевых действий или условий применения МБЛА террористической или диверсионной группой.

Учебно-тренировочные симуляторы и технические средства вида «стрелок–мишень» делятся на следующие группы (рис. 2).



Рис. 2. Основные группы стрелковых тренажеров «стрелок–мишень»

Учебно-тренировочные симуляторы и технические средства, «не определяющие точку попадания в мишень», можно представить следующей схемой, которая приведена рис. 3 [7].

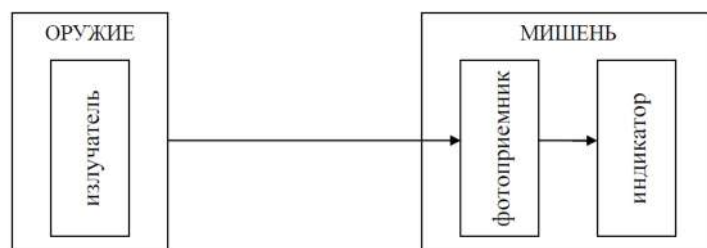


Рис. 3. Модель «ОРУЖИЕ – МИШЕНЬ»

Из рис. 3 следует, что модель «ОРУЖИЕ – МИШЕНЬ» работает в следующей последовательности:

- 1) «ОРУЖИЕ» модернизируется оптико-электронным излучателем, с использованием уникальных адаптеров устанавливается в ствольно-затворной группе средств ближнего боя, которое можно применять против МБЛА террористических и диверсионных групп;
- 2) при прохождении оптического излучения в среде между излучателем и мишенью, не встречая никаких препятствий, попадает в «МИШЕНЬ» на фотоприемник;
- 3) на мишени размещен индикатор, который сигнализирует звуком или светом о том, что «МИШЕНЬ» поражена.

Учебно-тренировочные симуляторы и технические средства, «условно определяющие точку попадания в мишень», работают аналогично модели (рис. 2). При попадании импульса лазерного излучения на электронную мишень на ее индикаторе высвечивается итоговый результат выстрела, например «7» или «8» или другое число, что не позволяет личному составу в борьбе с МБЛА террористической или диверсионной группы видеть точку попадания на мишени.

Использование ПЭВМ позволяет воспроизводить реальный звук выстрела и разрабатывать фоны и мишенную обстановку, приближенную к реальной, и сохранять эти данные, а также обрабатывать результат стрельбы.

Учебно-тренировочные симуляторы и технические средства вида «стрелок–мишень» группы «определяющие точку попадания в мишень» делятся на следующие подгруппы, представленные на рис. 4.



Рис. 4. Основные подгруппы тренажеров «стрелок–мишень»

Учебно-тренировочные симуляторы и технические средства подгруппы «с неподвижными мишенями» широко известны и используются на всех стрельбищах, особенно были распространены в школьных тирах, где занимались школьники спортивной стрельбой.

На практике дальность стрельбы до мишени осуществляется двумя способами: установкой мишени реальных размеров на реальной дальности стрельбы; установкой мишени уменьшенных размеров на сокращенной дальности стрельбы [6].

Рассмотрим две схемы моделирования процесса создания учебно-тренировочными симуляторами и техническими средствами для тренировки личного состава противодействию МБЛА террористических и диверсионных групп:

– модель «МИШЕНЬ – ОРУЖИЕ» – размещение элементов заключалось в использовании излучателей на мишени, при этом приемник находился в стволе оружия, при этом необходимо с помощью кабеля соединяться с ПЭВМ (рис. 5);

– модель «ОРУЖИЕ – МИШЕНЬ» – размещение элементов заключалось в использовании излучателей в стволе оружия, при этом приемник находился на мишени (рис. 6).



Рис. 5. Схема модели «МИШЕНЬ – ОРУЖИЕ»



Рис. 6. Схема модели «ОРУЖИЕ – МИШЕНЬ»

Из рис. 5 следует, что кабель, соединяющий оружие для стрельбы по МБЛА террористических и диверсионных групп с ПЭВМ, мешал выполнять действия личному составу.

Из рис. 6 следует, что излучатель расположен в стволе оружия и не связан соединительным кабелем с ПЭВМ. Это благоприятно влияет на свободу перемещения личного состава в противодействии МБЛА террористических и диверсионных групп.

В области образования появляются новые способы обучения, в том числе и те, что касаются тренировки навыкам стрельбы. Лазерные тренажеры становятся все более популярным выбором для школ и учебных заведений, предоставляя безопасную и эффективную альтернативу традиционным стрелковым площадкам (рис. 7) [8].

Лазерные тренажеры являются инновационными методами обучения стрельбе и отличаются простотой и надежностью в использовании. Они не требуют специальных навыков для обслуживания и могут быть легко настроены для работы с различными типами оружия.

Одним из ключевых элементов лазерного тренажера является его программное обеспечение. С его помощью можно создавать индивидуальные тренировочные программы, адаптированные под конкретные потребности пользователей. Это делает тренажер гибким инструментом как для начального обучения, так и для повышения профессиональной подготовки личного состава по противодействию МБЛА.

Для создания максимально реалистичной атмосферы тренажеры часто оснащают голосовым и звуковым сопровождением. Это позволяет пользователям получать обратную связь о своих действиях.



Рис. 7. Использование лазерных тренажеров

Одним из ключевых элементов лазерного тренажера является электронное оружие с лазерными модулями. Макеты оружия с красным и инфракрасным лучом в лазерных тренажерах работают на основе принципа излучения лазерного сигнала на мишень. Оружие с красным лучом использует видимый красный лазерный луч, который четко виден при стрельбе. Этот тип модели оружия обычно широко используется в различных тренировочных средах.

Интерактивный лазерный тир работает по принципу совместного взаимодействия с пользователем, создавая атмосферу реального боевого полигона. В целом интерактивный лазерный тир предоставляет пользователю возможность не просто стрелять по статичным мишеням, а активно взаимодействовать с виртуальной средой, что делает тренировку более захватывающей и эффективной. Работа электронного лазерного тира заключается в имитации стрельбы с помощью специальных макетов оружия, оснащенных лазерными модулями.

Таким образом, электронный лазерный тир предоставляет пользователям возможность эффективно тренироваться в стрельбе, используя имитацию лазерных выстрелов и электронную обработку данных о попаданиях.

Для работы программного обеспечения лазерного тренажера требуются минимальные системные требования. Обычно это стандартные характеристики современного персонального компьютера: процессор Intel Core i5 или аналогичный, оперативная память от 8 Гб, видеокарта с поддержкой OpenGL 2.0 и свободное место на жестком диске не менее 1 Гб. Также необходим доступ к Интернету для загрузки обновлений и облачного хранения данных [8].

В профессиональной подготовке личного состава по противодействию МБЛА используются оптико-электронные и электронные/интерактивные лазерные тир, которые представляют разные подходы к тренировке стрельбы. Их основные отличия заключаются в технологиях, которые они используют.

Электронные и интерактивные лазерные тир не требуют физического контакта с мишенью, так как они используют лазерные лучи для регистрации попаданий. Это делает их более удобными в использовании и позволяет более точно отслеживать результаты стрельбы. Кроме того, интерактивные лазерные тир предлагают дополнительные возможности для взаимодействия с пользователем, такие как изменение сценариев стрельбы, использование сенсоров движения и других технологий.

Заключение

В настоящее время возрастают квалификационные требования к профессиональной подготовке личного состава по противодействию МБЛА с использованием технических средств обучения. Технические средства обучения представляют собой эффективный и инновационный метод подготовки личного состава противодействию МБЛА, который находит широкое применение. Простота в использовании, гибкость в настройке и высокая эффективность делают их незаменимым инструментом при подготовке как начинающих, так и опытных профессионалов.

Список литературы

1. Пат. 2559332 C1 Российская Федерация, МПК G01S 17/00. Метод обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов / Шишков С. В. ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военная

академия материально технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации. № 2014107108/28 ; заявл. 25.02.2014 ; опубл. 10.08.2015.

2. Шишков С. В., Чернов Е. А., Исаев Э. К. Анализ современных систем распознавания целей с использованием нейронных сетей // Радиопромышленность. 2011. № 4. С. 58–67.
3. Пат. 2700107 С1 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, G01S 13/86. Комплекс борьбы с беспилотными летательными аппаратами / Шишков С. В., Устинов Е. М., Барсуков В. А. [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева». № 2018137613 ; заявл. 24.10.2018 ; опубл. 12.09.2019.
4. Пат. 2523446 С2 Российская Федерация, МПК G01S 3/78. Способ автоматизированного определения координат беспилотных летательных аппаратов / Шишков С. В. ; заявитель Федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования военный учебно-научный центр сухопутных войск «Общевойсковая академия вооруженных сил Российской Федерации» (ОВА ВС РФ). № 2011147093/07 ; заявл. 18.11.2011 ; опубл. 20.07.2014.
5. Протасов С. Ю. Начальная военная подготовка : учеб. пособие. Тверь, 2024. 242 с.
6. Инюшева Е. А., Федирко А. А., Чирич Ю. Л., Кириллов И. Г. Сравнительный анализ стрелковых тренажеров, используемых в процессе военно-профессиональной подготовки выпускников высшего военно-учебного заведения. СПб. : Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2016. 6 с.
7. Лазерполитех-2009 – Технологии и средства обеспечения огневой подготовки : сб. материалов III Междунар. форума. Новосибирск : Принтинг, 2010. 156 с.
8. Колдунов С. А. Стрелковые тренажеры: вместо пули – лазерный луч. М. : Синус, 1998. 128 с.
9. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность и терроризм : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2024. 308 с.
10. Бецов А. В., Осташкевич В. А., Ранюк М. А. Методологические подходы к выявлению уязвимости социально важных объектов террористическим угрозам // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2. С. 307–310.
11. Тулегулов А. Д., Ергалиев Д. С., Бейсембаева Б. С., Зуев Д. В. Методы исследования полетных нагрузок летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 48–56. doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-6

References

1. Pat. 2559332 C1 Russian Federation, MPK G01S 17/00. Method of detecting small-sized unmanned aerial vehicles. Shishkov S.V.; applicant Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Professional Education "Military Academy of Logistic Support named after General of the Army A.V. Khrulev" of the Ministry of Defense of the Russian Federation. № 2014107108/28; appl. 25.02.2014; publ. 10.08.2015. (In Russ.)
2. Shishkov S.V., Chernov E.A., Isaev E.K. Analysis of modern target recognition systems using neural networks. *Radiopromyshlennost' = Radio industry*. 2011;(4):58–67. (In Russ.)
3. Pat. 2700107 C1 Russian Federation, MPK F41H 11/02, G01S 13/86. Complex for combating unmanned aerial vehicles. Shishkov S.V., Ustinov E.M., Barsukov V.A. et al.; applicant Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Professional Education "Military Academy of Logistic Support named after General of the Army A.V. Khrulev" of the Ministry of Defense of the Russian Federation. № 2018137613 ; appl. 24.10.2018; publ. 12.09.2019. (In Russ.)
4. Pat. 2523446 C2 Russian Federation, MPK G01S 3/78. Method of automated determination of coordinates of unmanned aerial vehicles. Shishkov S. V.; applicant Federal State Military Educational Institution of Higher Professional Education Military Educational and Scientific Center of the Ground Forces Combined Arms Academy of the Armed Forces of the Russian Federation (Combined Arms Academy of the Armed Forces of the Russian Federation). № 2011147093/07; appl. 18.11.2011; publ. 20.07.2014.
5. Protasov S.Yu. *Nachal'naya voennaya podgotovka: ucheb. posobie = Initial military training: textbook*. Tver, 2024:242. (In Russ.)
6. Inyusheva E.A., Fedirko A.A., Chirich Yu.L., Kirillov I.G. *Sravnitel'nyy analiz strelkovykh trenazherov, ispol'zuemykh v protsesse voenno-professional'noy podgotovki vypusnikov vysshego voenno-uchebnogo zavedeniya = Comparative analysis of shooting simulators used in the process of military professional training of graduates of a higher military educational institution*. Saint-Petersburg: Voennno-kosmicheskaya akademiya imeni A.F. Mozhayskogo, 2016:6. (In Russ.)
7. *Lazerpolytekh-2009 – Tekhnologii i sredstva obespecheniya ognevoy podgotovki: sb. materialov III Mezhdunar. Foruma = Laserpolitech-2009 – Technologies and means of providing fire training : collection of materials of the III International the forum*. Novosibirsk: Printing, 2010:156. (In Russ.)
8. Koldunov S.A. *Strelkovye trenazhery: vmesto puli – lazernyy luch = Shooting simulators: instead of a bullet, a laser beam*. Moscow: Sinus, 1998:128. (In Russ.)
9. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' i terrorizm: monografiya = Security and terrorism: monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2024:308. (In Russ.)

10. Betskov A.V., Ostashkevich V.A., Ranyuk M.A. Methodological approaches to identifying the vulnerability of socially important facilities to terrorist threats. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2:307–310. (In Russ.)
11. Tulegulov A.D., Ergaliev D.S., Beysembaeva B.S., Zuev D.V. Methods for studying flight loads of aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):48–56. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-6

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Godunov@pnzgu.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of automatics and telemechanics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Михаил Владимирович Ерофеев

соискатель,
Филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза-5, Военный городок)
E-mail: penza.vamto@mil.ru

Mikhail V. Erofeev

Applicant,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after General of the Army
A.V. Khrulev in Penza
(Russia, Penza-5, Military Town)

Аскар Гадылшиевич Избасов

заместитель начальника Военного института,
Военный институт сил воздушной обороны
Республики Казахстан
(Республика Казахстан, г. Актобе,
пр-т А. Молдагуловой, 16)
E-mail: iag1973@mail.ru

Askar G. Izbasov

Deputy head of the Military Institute,
Military Institute of the Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
(16 A. Moldagulova avenue, Aktobe,
Republic of Kazakhstan)

Асылбек Маратович Мухамбетов

старший офицер отдела связи
и радиотехнического обеспечения,
Военный институт сил воздушной обороны
Республики Казахстан
(Республика Казахстан, г. Актобе,
пр-т А. Молдагуловой, 16)
E-mail: suimbayeva@internet.ru

Asylbek M. Mukhambetov

Senior officer of the communications
and radio engineering support department,
Military Institute of the Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
(16 A. Moldagulova avenue, Aktobe,
Republic of Kazakhstan)

Павел Дмитриевич Головин

ведущий инженер кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: GPD75@yandex.ru

Pavel D. Golovin

Leading engineer of the sub-department
of design and production of radio equipment,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 14.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.04.2025

Принята к публикации / Accepted 12.05.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.382.2

doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-5

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ Sb НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И МОДЕЛЬ ЗАМЕЩЕНИЯ $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ С ОБРАЗОВАНИЕМ ДЕФЕКТОВ КИСЛОРОДА

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², У. С. Чихрина³,
В. С. Александров⁴, Д. В. Артамонов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ chikhulyana@yandex.ru, ⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды (ППО) являются ключевыми функциональными материалами для современных оптоэлектронных устройств, включая сенсорные экраны, солнечные элементы и светодиоды. Диоксид олова, легированный сурьмой ($\text{SnO}_2:\text{Sb}$), представляет особый интерес как альтернатива более дорогостоящему оксиду индия-олова (ИТО) благодаря высокой термической и химической стабильности, а также доступности исходных компонентов. Однако механизмы встраивания атомов Sb в кристаллическую решетку SnO_2 и их влияние на электрические и оптические свойства изучены недостаточно. Цель данного исследования – теоретическое и экспериментальное изучение процессов замещения атомов олова атомами сурьмы в различных степенях окисления (Sb^{3+} и Sb^{5+}) и определение оптимальных условий синтеза для получения ППО с улучшенными характеристиками. *Материалы и методы.* Тонкие пленки $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ были получены методом спрей-пиролиза из растворов прекурсоров $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и SbCl_3 в смеси этанола и деионизированной воды при температуре подложки 450 °С. Концентрация сурьмы варьировалась от 0 до 10 ат. %. Для улучшения кристалличности и активации примеси образцы подвергались термическому отжигу при 600 °С в течение 1 ч. Структурные, электрические и оптические свойства полученных пленок исследовались комплексом современных методов, включая измерение поверхностного сопротивления, подвижности и концентрации носителей заряда, коэффициентов пропускания, преломления и поглощения. *Результаты.* Установлено, что при оптимальной концентрации сурьмы (3–5 ат. %) и правильно подобранных условиях синтеза преимущественно происходит замещение Sn^{4+} на Sb^{5+} , что приводит к донорному легированию и значительному улучшению электропроводности при сохранении высокой прозрачности в видимом диапазоне (80–90 %). Выявлено, что при концентрациях Sb выше 5 ат. % возможно образование компенсирующих дефектов и сегрегация фаз, приводящие к ухудшению электрических характеристик. Термический отжиг способствует улучшению кристалличности, снижению концентрации дефектов и активации примеси Sb, что проявляется в снижении удельного сопротивления с 10^{-2} – 10^{-3} Ом·см до 10^{-3} – 10^{-4} Ом·см. *Выводы.* Исследование позволило установить фундаментальные закономерности встраивания атомов сурьмы в кристаллическую решетку SnO_2 и оптимизировать параметры синтеза методом спрей-пиролиза для получения высококачественных ППО на основе $\text{SnO}_2:\text{Sb}$. Разработанный материал демонстрирует сочетание высокой прозрачности, хорошей электропроводности и термической стабильности, что указывает на его перспективность для применения в различных оптоэлектронных устройствах, включая солнечные элементы и сенсорные экраны. Использование доступных и экологически безопасных материалов способствует устойчивому развитию технологии и снижению зависимости производства от редких и дорогостоящих элементов.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, диоксид олова, легирование сурьмой, кристаллическая структура, спрей-пиролиз, механизмы замещения, электрические свойства, оптические характеристики

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования: Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Чихрина У. С., Александров В. С., Артамонов Д. В. Влияние легирования Sb на кристаллическую структуру и модель замещения $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ с образованием дефектов кислорода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 37–45. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-5

THE EFFECT OF SB DOPING ON CRYSTAL STRUCTURE AND THE $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ SUBSTITUTION MODEL WITH OXYGEN DEFECT FORMATION

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², U.S. Chikhrina³,
V.S. Aleksandrov⁴, D.V. Artamonov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³chikhulyana@yandex.ru, ⁴vsalexrus@gmail.com, ⁵dmirtartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides (TCOs) are key functional materials for modern optoelectronic devices, including touch screens, solar cells, and light-emitting diodes. Antimony-doped tin dioxide ($\text{SnO}_2\text{:Sb}$) is of particular interest as an alternative to the more expensive indium tin oxide (ITO) due to its high thermal and chemical stability, as well as the availability of raw materials. However, the mechanisms of Sb incorporation into the SnO_2 crystal lattice and its influence on electrical and optical properties remain insufficiently studied. The objective of this research is a theoretical and experimental investigation of the substitution processes of tin atoms with antimony atoms in different oxidation states (Sb^{3+} and Sb^{5+}) and the determination of optimal synthesis conditions for producing TCOs with improved characteristics. *Materials and methods.* Thin $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ films were deposited using spray pyrolysis from precursor solutions of $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ and SbCl_3 in a mixture of ethanol and deionized water at a substrate temperature of 450 °C. The antimony concentration was varied from 0 to 10 at. %. To improve crystallinity and activate dopants, the samples were thermally annealed at 600 °C for 1 hour. The structural, electrical, and optical properties of the films were studied using a comprehensive set of advanced techniques, including surface resistance, charge carrier mobility and concentration, as well as transmission, refraction, and absorption coefficients. *Results.* It was found that at an optimal antimony concentration (3–5 at. %) and properly selected synthesis conditions, Sn^{4+} is predominantly substituted by Sb^{5+} , leading to donor doping and a significant improvement in conductivity while maintaining high transparency in the visible range (80–90 %). At Sb concentrations above 5 at. %, the formation of compensating defects and phase segregation was observed, resulting in degraded electrical properties. Thermal annealing enhanced crystallinity, reduced defect concentration, and activated Sb dopants, leading to a decrease in resistivity from 10^{-2} – $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ to 10^{-3} – $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. *Conclusion.* This study established fundamental mechanisms of antimony incorporation into the SnO_2 crystal lattice and optimized spray pyrolysis synthesis parameters for producing high-quality $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ -based TCOs. The developed material exhibits a combination of high transparency, good conductivity, and thermal stability, making it promising for various optoelectronic applications, including solar cells and touch screens. The use of cost-effective and environmentally friendly materials promotes sustainable technological development and reduces reliance on rare and expensive elements.

Keywords: transparent conducting oxides, tin dioxide, antimony doping, crystal structure, spray pyrolysis, substitution mechanisms, electrical properties, optical characteristics

Financing: the work was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Synthesis and research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices» (№ 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Chikhrina U.S., Aleksandrov V.S., Artamonov D.V. The effect of Sb doping on crystal structure and the $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ substitution model with oxygen defect formation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):37–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-5

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой уникальный класс материалов, сочетающих высокую оптическую прозрачность в видимом диапазоне спектра с хорошей электрической проводимостью. Эти свойства обусловили их широкое применение в оптоэлектронных устройствах, включая солнечные элементы, плоские дисплеи, электрохромные устройства,

газовые сенсоры и светоизлучающие диоды [1–3]. Среди многообразия ППО особое место занимают оксиды на основе SnO_2 , которые привлекают внимание благодаря высокой химической и термической стабильности, относительно низкой стоимости и экологической безопасности по сравнению с широко используемым оксидом индия-олова (ITO).

Диоксид олова (SnO_2) является широкозонным полупроводником n -типа с запрещенной зоной около 3,6 эВ, что обеспечивает его высокую прозрачность в видимом диапазоне [1]. Кристаллическая структура рутила с тетрагональной элементарной ячейкой SnO_2 изображена на рис. 1. Однако собственная электропроводность нелегированного SnO_2 недостаточна для многих практических применений [4]. Для улучшения электрических свойств SnO_2 обычно легируют различными элементами, среди которых наиболее эффективными являются сурьма (Sb), фтор (F) и тантал (Ta) [5, 6].

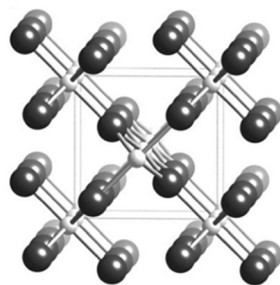


Рис. 1. Кристаллическая структура тетрагонального SnO_2 со структурой касситерита

Легирующее сурьмой является одним из наиболее распространенных подходов к модификации свойств SnO_2 . Считается, что ионы Sb^{5+} , замещая Sn^{4+} в кристаллической решетке, действуют как доноры электронов, увеличивая концентрацию носителей заряда и, следовательно, проводимость материала [7, 8]. Однако фундаментальное понимание механизмов внедрения сурьмы в решетку SnO_2 и сопутствующих структурных изменений остается предметом научных дискуссий.

Механизм легирования осложняется тем, что сурьма может существовать в различных валентных состояниях, преимущественно Sb^{5+} и Sb^{3+} . Если ионы Sb^{5+} действуют как доноры электронов, то ионы Sb^{3+} могут проявлять акцепторные свойства, компенсируя донорный эффект. Кроме того, взаимодействие примеси Sb с собственными дефектами решетки SnO_2 , особенно с кислородными вакансиями, существенно влияет на структурные и электронные свойства материала.

Метод спрей-пиролиза (рис. 2) представляет собой перспективную технологию получения тонких пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ благодаря своей простоте, масштабируемости и экономической эффективности. Этот метод позволяет контролировать состав, микроструктуру и функциональные свойства пленок путем варьирования параметров процесса, таких как температура подложки, концентрация прекурсоров и скорость осаждения [5, 6].

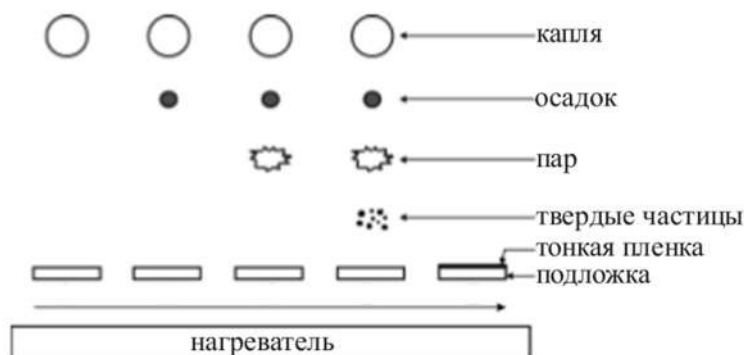


Рис. 2. Этапы получения тонкой пленки методом пиролиза аэрозолей

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных пленкам $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, многие аспекты влияния легирования на кристаллическую структуру и дефектообразование остаются недостаточно изученными. В частности, это механизмы внедрения ионов Sb

в решетку SnO_2 в зависимости от условий синтеза, взаимосвязь между концентрацией легирующей примеси и параметрами кристаллической решетки, роль кислородных вакансий в процессах легирования и их влияние на электронную структуру материала, формирование примесно-дефектных комплексов и их влияние на функциональные свойства пленок, микроструктурные изменения при легировании и их корреляция с оптическими и электрическими характеристиками.

Исследование указанных взаимосвязей имеет не только фундаментальное значение для понимания физико-химических процессов в легированных оксидных полупроводниках, но и практическую ценность для целенаправленной оптимизации функциональных свойств пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$.

Материалы и методы

Для синтеза тонких пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ использовались следующие реактивы: пентагидрат хлорида олова ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, чистота 99,9 %), трихлорид сурьмы (SbCl_3 , чистота 99,5 %), этиловый спирт ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, чистота 99,9 %), деионизированная вода.

Для приготовления раствора прекурсоров сначала готовился основной раствор хлорида олова с концентрацией 0,1 моль/л путем растворения 35,06 г $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в смеси этанола и деионизированной воды в соотношении 1:1 при комнатной температуре и интенсивном перемешивании. Затем готовился раствор хлорида сурьмы с концентрацией 0,1 моль/л путем растворения 22,83 г SbCl_3 в этаноле. Необходимое количество раствора SbCl_3 добавлялось к основному раствору SnCl_4 для получения целевой концентрации Sb относительно Sn (от 0 до 10 ат. %). Полученные растворы выдерживались при комнатной температуре в течение 24 ч для обеспечения стабильности и гомогенности перед использованием.

В качестве подложек использовались предварительно очищенные стеклянные пластины размером $25 \times 25 \times 1$ мм³. Процедура очистки включала последовательную ультразвуковую обработку в ацетоне, изопропиловом спирте и деионизированной воде (по 15 мин в каждом растворителе) с последующей сушкой в потоке азота [6, 9]. Тонкие пленки $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ наносились методом пневматического спрей-пиролиза с использованием установки, схема представлена на рис. 3.

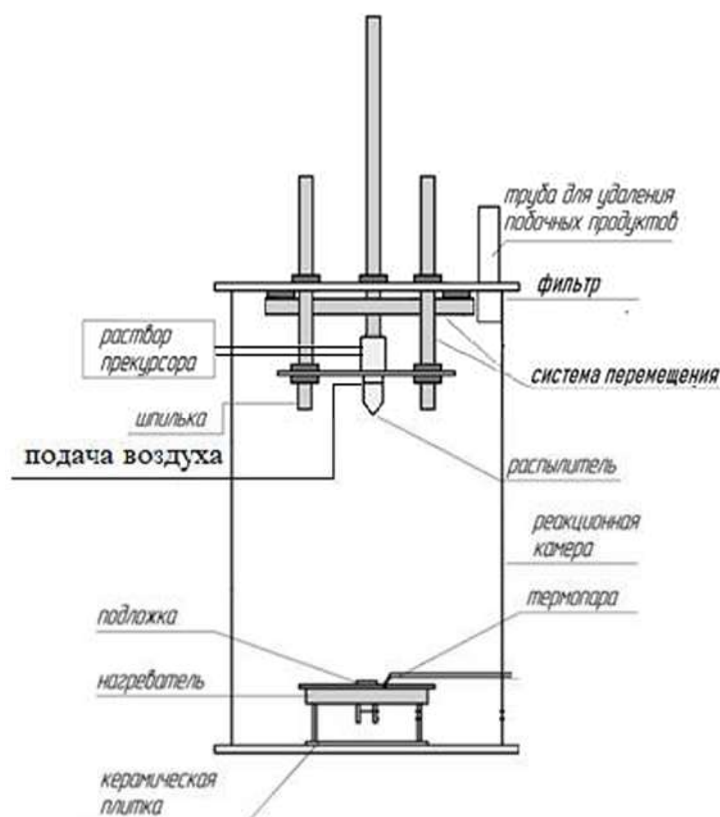


Рис. 3. Схема установки для получения покрытий методом спрей-пиролиза

Процесс напыления проводился при следующих параметрах:

- температура подложки: 450 °С;
- давление в пневматическом распылителе: 2 бара;

- расстояние от сопла распылителя до подложки: 30 см;
- скорость подачи раствора: 5 мл/мин;
- общий объем распыляемого раствора варьировался от 5 до 20 мл.

Были получены серии образцов с различной концентрацией сурьмы (0, 3, 5, 7 и 10 ат. % относительно олова). После осаждения образцы охлаждались естественным образом до комнатной температуры в атмосфере воздуха.

Образцы подвергались термической постобработке для исследования влияния отжига на структуру и свойства пленок. Отжиг проводился в муфельной печи при температуре 600 °С в течение 1 ч.

Морфология поверхности и толщина пленок изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа. Поверхностное сопротивление пленок измерялось четырехзондовым методом. Концентрация и подвижность носителей заряда определялись методом Холла в конфигурации Ван-дер-Пау. Время релаксации и плазменная частота рассчитывались на основе модели Друде из измерений электрических свойств. Толщина покрытий определялась спектральным эллипсометрическим методом.

Теоретический анализ механизмов встраивания атомов сурьмы в кристаллическую решетку SnO₂ проводился с использованием литературных данных и собственных экспериментальных результатов.

Результаты

Все синтезированные пленки SnO₂:Sb кристаллизуются в тетрагональной сингонии со структурой рутила (пространственная группа P4₂/mmn). Наблюдаются характерные рефлексы [1, 10], соответствующие плоскостям (110), (101), (200), (211) и (301) для SnO₂. При увеличении концентрации сурьмы от 0 до 5 ат. % не наблюдается образования дополнительных фаз, что свидетельствует об успешном встраивании атомов Sb в кристаллическую решетку SnO₂.

Анализ положений дифракционных максимумов показал небольшое смещение пиков в сторону больших углов при увеличении концентрации Sb, что указывает на уменьшение параметров элементарной ячейки. Расчетные значения параметров решетки *a* и *c* уменьшаются с увеличением концентрации Sb согласно зависимостям:

$$\Delta a/a = -0,0012x; \Delta c/c = -0,0008x,$$

где *x* – концентрация Sb в ат. %.

Такое поведение параметров решетки свидетельствует о преимущественном замещении ионов Sn⁴⁺ (ионный радиус 0,69 Å) ионами Sb⁵⁺ (ионный радиус 0,60 Å), что согласуется с теоретической моделью донорного легирования [10, 11].

СЭМ-изображения (рис. 4) демонстрируют, что пленки имеют однородную мелкозернистую структуру с размером кристаллитов 20–30 нм. При введении Sb наблюдается небольшое уменьшение размера зерен (в диапазоне от 15 до 25 нм) при концентрации 3–5 ат. %, что можно объяснить замедлением роста кристаллитов в присутствии примеси.

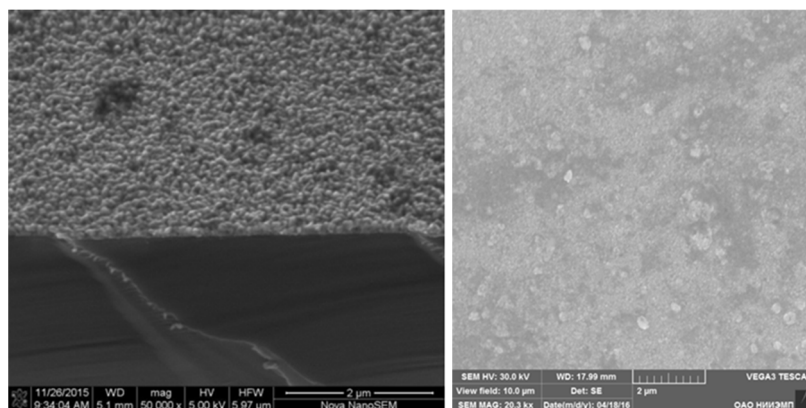


Рис. 4. СЭМ-изображения пленок с размером кристаллитов 20–30 нм

Термическая постобработка при 600 °С приводит к увеличению размера кристаллитов (в диапазоне от 35 до 50 нм), а также к улучшению кристалличности, что подтверждается

увеличением интенсивности и уменьшением полуширины дифракционных пиков. Морфология поверхности становится более однородной после отжига, с уменьшением количества дефектов и пор.

Толщина пленок, определенная методом эллипсометрии, находится в диапазоне от 100 до 300 нм и остается практически неизменной при разных концентрациях Sb, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости процесса напыления.

Результаты измерений методом Холла показали, что легирование Sb значительно влияет на электрические свойства пленок SnO₂ (рис. 5, 6). Нелегированный SnO₂ демонстрирует *n*-тип проводимости с концентрацией носителей заряда порядка 10^{18} см⁻³, что связано с собственными дефектами, преимущественно кислородными вакансиями.

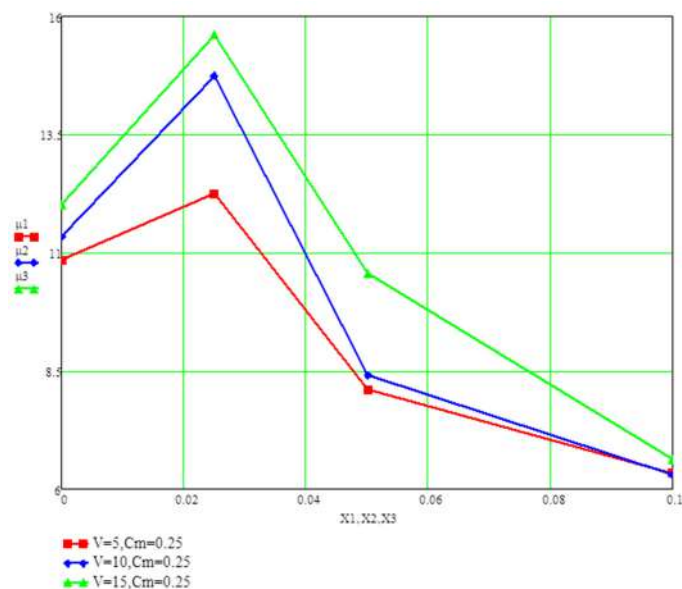


Рис. 5. Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси, при $V=10$ мл, $V=15$ мл и $V=20$ мл (V – объем раствора; C_m – концентрация прекурсора)

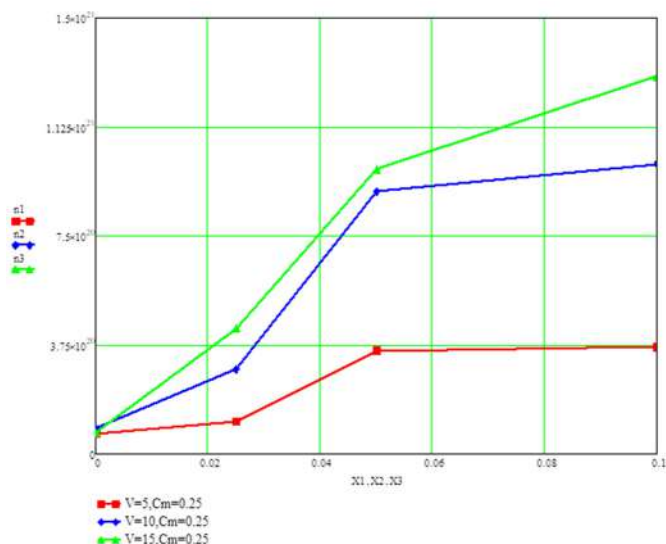


Рис. 6. Зависимость объемной концентрации носителей заряда от концентрации примеси

При введении Sb концентрация электронов монотонно возрастает, достигая максимального значения $2,33 \cdot 10^{21}$ см⁻³ при содержании Sb 7 ат. %. Дальнейшее увеличение концентрации Sb приводит к снижению концентрации носителей заряда, что может быть связано с образованием компенсирующих дефектов, возможным встраиванием части атомов Sb в виде Sb³⁺ или сегрегацией примеси на границах зерен.

Подвижность носителей заряда демонстрирует обратную зависимость от концентрации Sb, снижаясь с 32 см²/(В·с) для нелегированного SnO₂ до 9,15 см²/(В·с) при 5 ат. % Sb. Это объясняется увеличением рассеяния электронов на ионизированных примесях.

Термический отжиг приводит к увеличению как концентрации, так и подвижности носителей заряда, что свидетельствует об активации примеси Sb и улучшении кристалличности материала [7, 10, 12].

Удельное сопротивление пленок существенно снижается с 10^{-1} Ом·см для нелегированного SnO₂ до минимального значения $1,48 \cdot 10^{-3}$ Ом·см при концентрации Sb 5 ат. % после отжига. Такое значительное снижение сопротивления (более чем на два порядка) подтверждает эффективность донорного легирования при замещении Sn⁴⁺ на Sb⁵⁺.

Зависимость сопротивления от концентрации Sb имеет минимум при 5 ат. %, что соответствует оптимальной концентрации примеси. При более высоких концентрациях сопротивление начинает возрастать, что коррелирует с уменьшением концентрации и подвижности носителей заряда.

Плазменная частота, рассчитанная на основе модели Друде, возрастает с $1,2 \cdot 10^{14}$ Гц для нелегированного SnO₂ до $4,99 \cdot 10^{15}$ Гц при концентрации Sb 5 ат. %, что согласуется с увеличением концентрации свободных носителей заряда.

Анализ структурных и электрических свойств пленок SnO₂:Sb позволяет сделать вывод о преимущественном механизме легирования через замещение Sn⁴⁺ на Sb⁵⁺. Это подтверждается экспериментальными фактами.

При этом можно предположить, что при концентрациях Sb > 5 ат. % часть атомов примеси может встраиваться в виде Sb³⁺ или образовывать другие дефекты, что приводит к деградации электрических свойств.

Термический отжиг оказывает положительное влияние на свойства пленок SnO₂:Sb благодаря следующим основным аспектам:

- улучшению кристалличности и увеличению размера зерен;
- активации примеси Sb и увеличению концентрации носителей заряда;
- уменьшению концентрации структурных дефектов;
- улучшению стехиометрии по кислороду.

Таким образом, для получения оптимальных свойств пленок SnO₂:Sb необходимо использовать концентрацию примеси от 5 до 7 ат. % и проводить постобработку при температуре не ниже 600 °С.

Заключение

На основании проведенного комплексного исследования влияния легирования сурьмой на кристаллическую структуру, дефектообразование и функциональные свойства тонких пленок SnO₂, полученных методом спрей-пиролиза, можно сформулировать следующие основные выводы:

– подтвержден эффективный механизм встраивания атомов сурьмы в кристаллическую решетку SnO₂ без образования отдельных фаз до концентрации 10 ат. %. Замещение ионов Sn⁴⁺ ионами Sb⁵⁺ с меньшим ионным радиусом приводит к систематическому уменьшению параметров решетки (от $a = b = 4,737$ Å, $c = 3,186$ Å для нелегированного SnO₂ до $a = b = 4,724$ Å, $c = 3,176$ Å для 10 ат. % Sb) и изменению преимущественной ориентации кристаллитов от [110] к [101] и [211];

– установлено существенное влияние легирования сурьмой на микроструктуру пленок, проявляющееся в уменьшении среднего размера кристаллитов (от 56 ± 4 нм для нелегированного SnO₂ до 23 ± 2 нм для 10 ат. % Sb) и увеличении микронапряжений в кристаллической решетке. Обнаружено, что атомы сурьмы проявляют тенденцию к сегрегации на границах зерен при высоких концентрациях легирования;

– определено соотношение валентных состояний сурьмы Sb⁵⁺/Sb³⁺ в зависимости от общей концентрации легирующей примеси. Показано преобладание Sb⁵⁺ при низких концентрациях ($Sb^{5+}/Sb^{3+} > 4$ для 1–3 ат. % Sb) и существенное увеличение доли Sb³⁺ при высоких концентрациях ($Sb^{5+}/Sb^{3+} \approx 1,8$ для 10 ат. % Sb), что объясняет нелинейность влияния легирования на электрические свойства;

– разработана и экспериментально подтверждена модель, согласно которой при концентрациях Sb до 3–5 ат. % доминирует механизм донорного легирования (Sn⁴⁺ → Sb⁵⁺), приводящий к линейному росту концентрации носителей заряда (до $5 \cdot 10^{20}$ см⁻³) с эффективностью около 0,7–0,8 электрона на атом Sb. При более высоких концентрациях эффективность легирования снижается из-за компенсационных эффектов: увеличения доли акцепторных центров Sb³⁺, формирования электрически нейтральных комплексов «примесь–дефект» и сегрегации примеси на границах зерен;

– установлена ключевая роль кислородных вакансий в процессах легирования SnO_2 сурьмой. Теоретические расчеты и экспериментальные данные свидетельствуют о значительном снижении энергии формирования кислородных вакансий в присутствии Sb^{5+} и образовании стабильных комплексов «Sb на месте Sn – кислородная вакансия» с энергией связи около 0,5 эВ, что особенно существенно при высоких концентрациях Sb;

– показано, что термическая постобработка пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ существенно влияет на соотношение $\text{Sb}^{5+}/\text{Sb}^{3+}$ и концентрацию кислородных вакансий, что позволяет дополнительно оптимизировать функциональные свойства. Отжиг в окислительной атмосфере способствует увеличению доли Sb^{5+} и снижению концентрации кислородных вакансий, в то время как отжиг в восстановительной атмосфере оказывает противоположное воздействие.

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание фундаментальных аспектов легирования SnO_2 сурьмой и механизмов формирования функциональных свойств прозрачных проводящих покрытий.

Список литературы

1. Batzill M., Diebold U. The surface and materials science of tin oxide // *Progress in Surface Science*. 2005. Vol. 79, № 2-4. P. 47–154. doi: 10.1016/j.progsurf.2005.09.002
2. Granqvist C. G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007. Vol. 91, № 17. P. 1529–1598. doi: 10.1016/j.solmat.2007.04.031
3. Liu Y., Li Y., Zeng H. ZnO-Based Transparent Conductive Thin Films: Doping, Performance, and Processing // *Journal of Nanomaterials*. 2013. Vol. 2013. P. 196521. doi: 10.1155/2013/196521
4. Bae J. W., Kim H. J., Kim J. S., Yeom G. Y. Development of transparent conducting oxide films for organic light-emitting diode applications // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 51, № 8. P. 08HA02. doi: 10.7567/JJAP.51.08HA02
5. Yadav A. A., Masumdar E. U., Moholkar A. V., Rajpure K. Y. Effect of quantity of spraying solution on structural, optical, electrical and morphological properties of spray deposited antimony doped tin oxide thin films // *Physica B: Condensed Matter*. 2010. Vol. 405, № 18. P. 3995–4000. doi: 10.1016/j.physb.2010.06.050
6. Ravichandran K., Philominathan P. Fabrication of antimony doped tin oxide (ATO) films by an inexpensive, simplified spray technique using perfume atomizer // *Materials Letters*. 2008. Vol. 62, № 17-18. P. 2980–2983. doi: 10.1016/j.matlet.2008.01.088
7. Terrier C., Chatelon J. P., Roger J. A. Electrical and optical properties of Sb:SnO₂ thin films obtained by the sol-gel method // *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 295, № 1-2. P. 95–100. doi: 10.1016/S0040-6090(96)09274-7
8. Yang J. L., Liu Y. J., Lin H. J., Chen C. C. A chain-structure nanosized Sb-doped SnO₂ humidity sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. Vol. 153, № 1. P. 78–85. doi: 10.1016/j.snb.2010.10.010
9. Moholkar A. V., Pawar S. M., Rajpure K. Y. [et al.]. Effect of fluorine doping on highly transparent conductive spray deposited nanocrystalline tin oxide thin films // *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 255, № 23. P. 9358–9364. doi: 10.1016/j.apsusc.2009.07.035
10. Mishra R. L., Dutta S. K., Choudhary R. N. P. Analysis of impedance and modulus parameters of Sb-doped SnO₂ // *Materials Science-Poland*. 2009. Vol. 27, № 4. P. 1125–1134.
11. Thangaraju B. Structural and electrical studies on highly conducting spray deposited fluorine and antimony doped SnO₂ thin films from SnCl₄ precursor // *Thin Solid Films*. 2002. Vol. 402, № 1-2. P. 71–78. doi: 10.1016/S0040-6090(01)01667-4
12. Martínez A. I., Huerta L., de León J. M. O. [et al.]. Physicochemical characteristics of fluorine doped tin oxide films // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006. Vol. 39, № 23. P. 5091–5096. doi: 10.1088/0022-3727/39/23/029

References

1. Batzill M., Diebold U. The surface and materials science of tin oxide. *Progress in Surface Science*. 2005;79(2-4):47–154. doi: 10.1016/j.progsurf.2005.09.002
2. Granqvist C.G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007;91(17):1529–1598. doi: 10.1016/j.solmat.2007.04.031
3. Liu Y., Li Y., Zeng H. ZnO-Based Transparent Conductive Thin Films: Doping, Performance, and Processing. *Journal of Nanomaterials*. 2013;2013:196521. doi: 10.1155/2013/196521
4. Bae J.W., Kim H.J., Kim J.S., Yeom G.Y. Development of transparent conducting oxide films for organic light-emitting diode applications. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012;51(8):08HA02. doi: 10.7567/JJAP.51.08HA02
5. Yadav A.A., Masumdar E.U., Moholkar A.V., Rajpure K.Y. Effect of quantity of spraying solution on structural, optical, electrical and morphological properties of spray deposited antimony doped tin oxide thin films. *Physica B: Condensed Matter*. 2010;405(18):3995–4000. doi: 10.1016/j.physb.2010.06.050
6. Ravichandran K., Philominathan P. Fabrication of antimony doped tin oxide (ATO) films by an inexpensive, simplified spray technique using perfume atomizer. *Materials Letters*. 2008;62(17-18):2980–2983. doi: 10.1016/j.matlet.2008.01.088

7. Terrier C., Chatelon J.P., Roger J.A. Electrical and optical properties of Sb:SnO₂ thin films obtained by the sol-gel method. *Thin Solid Films*. 1997;295(1-2):95–100. doi: 10.1016/S0040-6090(96) 09274-7
8. Yang J.L., Liu Y.J., Lin H.J., Chen C.C. A chain-structure nanosized Sb-doped SnO₂ humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011;153(1):78–85. doi: 10.1016/j.snb.2010.10.010
9. Moholkar A.V., Pawar S.M., Rajpure K.Y. et al. Effect of fluorine doping on highly transparent conductive spray deposited nanocrystalline tin oxide thin films. *Applied Surface Science*. 2009;255(23):9358–9364. doi: 10.1016/j.apsusc.2009.07.035
10. Mishra R.L., Dutta S.K., Choudhary R.N.P. Analysis of impedance and modulus parameters of Sb-doped SnO₂. *Materials Science-Poland*. 2009;27(4):1125–1134.
11. Thangaraju B. Structural and electrical studies on highly conducting spray deposited fluorine and antimony doped SnO₂ thin films from SnCl₄ precursor. *Thin Solid Films*. 2002;402(1-2):71–78. doi: 10.1016/S0040-6090(01)01667-4
12. Martínez A.I., Huerta L., de León J.M.O. [et al.]. Physicochemical characteristics of fluorine doped tin oxide films. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006;39(23):5091–5096. doi: 10.1088/0022-3727/39/23/029

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ульяна Сергеевна Чихрина

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chikhulyana@yandex.ru

Ulyana S. Chikhrina

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsalexrus@gmail.com

Vladimir S. Aleksandrov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Владимирович Артамонов

доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Dmitry V. Artamonov

Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 04.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.03.2025

Принята к публикации / Accepted 07.04.2025

СОЗДАНИЕ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУР ДАТЧИКОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРООБРАБОТКИ КРЕМНИЯ

А. А. Филатова¹, В. Е. Пауткин², Д. В. Тразанов³

^{1,2,3} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

¹nsmvaa@gmail.ru, ²pautkin_ve@niifi.ru, ³dtrazanov00@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Описаны основные защитные маскирующие слои, применяемые при формировании датчиков информационно-измерительных систем методами анизотропного травления кремния. К числу таких слоев относятся пленки диоксида и нитрида кремния, наносимые на поверхность кремниевых пластин перед технологическими операциями анизотропного травления. *Материалы и методы.* Показано, что при использовании комбинированных масок, состоящих как минимум из двух защитных слоев, возможно формирование кремниевых структур, имеющих сложный профиль травления. Это повышает технологичность изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков, так как формирование топологии маски на поверхности кремниевых пластин приводит к повышению качества изготовления и позволяет создавать новые структуры чувствительных элементов датчиков. *Результаты и выводы.* Данные технические решения позволяют создавать новые элементы структур датчиков ИИС, а также повысить технологичность их изготовления.

Ключевые слова: датчик, информационно-измерительные системы, микрообработка кремния, чувствительный элемент, селективность травления, маскирующий слой

Для цитирования: Филатова А. А., Пауткин В. Е., Тразанов Д. В. Создание новых элементов структур датчиков информационно-измерительных систем на основе технологий микрообработки кремния // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 46–51. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-6

CREATION OF NEW ELEMENTS OF SENSOR STRUCTURES OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS BASED ON SILICON MICROPROCESSING TECHNOLOGIES

A.A. Filatova¹, V.E. Pautkin², D.V. Trazanov³

^{1,2,3} Scientific-Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

¹nsmvaa@gmail.ru, ²pautkin_ve@niifi.ru, ³dtrazanov00@mail.ru

Abstract. *Background.* The main protective masking layers used in the formation of sensors of information-measurement systems by anisotropic etching of silicon are described. Such layers include films of silicon dioxide and nitride applied to the surface of silicon wafers before technological operations of anisotropic etching. *Materials and methods.* It is shown that when using combined masks consisting of at least two protective layers, it is possible to form silicon structures with sensors having a complex etching profile. This increases the manufacturability of the sensitive elements of micromechanical sensors, since the formation of the mask topology on the surface of silicon wafers leads to improved manufacturing quality and allows you to create new structures of sensitive sensor elements. *Results and conclusions.* These technical solutions make it possible to create new elements of sensor structures of information-measurement systems (IMS), as well as to increase the manufacturability of their manufacture.

Keywords: sensor, information-measurement systems, silicon microprocessing, sensitive element, etching selectivity, masking layer

For citation: Filatova A.A., Pautkin V.E., Trazanov D.V. Creation of new elements of sensor structures of information and measurement systems based on silicon microprocessing technologies. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):46–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-6

Введение

Преимущества микромеханических датчиков заключаются в их компактности и миниатюрности, а также в способности сохранять работоспособность в течение длительного времени, обеспечивая при этом высокую чувствительность, быстродействие, скорость измерения [1]. Чувствительный элемент микромеханических датчиков содержит кремниевый кристалл, выполненный методом объемной и поверхностной микрообработки кремния из исходной кремниевой пластины. Точность выполнения конструктивных элементов кристалла определяет параметры микромеханического датчика. Так, собственная частота чувствительного элемента зависит от таких параметров, как масса конструкции, коэффициент жесткости, который в свою очередь зависит от геометрических размеров упругого элемента кремниевого кристалла [2]:

$$G_y = 4\pi^2 f^2 m \left(\frac{a_m^2}{3} + \frac{c_m^2}{12} \right), \quad (1)$$

где G_y – угловая жесткость подвеса маятникового ЧЭ; f – собственная частота чувствительного элемента, Гц; m – масса ЧЭ, кг; a_m – длина чувствительной массы, м; c_m – толщина чувствительной массы, м.

В технологии микромеханических датчиков упругие элементы кристалла выполняются методом анизотропного травления кремния в едином технологическом процессе [3]. Наиболее распространенным травителем при этом является водный раствор гидроксида калия КОН с концентрацией 25–40 %. При выполнении кристалла методами анизотропного травления актуальной остается проблема защиты поверхности при глубинном травлении, которая решается выбором подходящих маскирующих слоев. Особенно остро данная проблема возникает при получении упругих элементов, имеющих сложное сечение профиля.

Защитные маскирующие покрытия

Маской при травлении кремния в растворах КОН чаще всего являются слои оксида (толщиной 0,4...1,2 мкм) и нитрида кремния (толщиной 0,3...0,7 мкм). Их выбор обусловлен следующим. Оксид кремния в растворах КОН имеет скорость травления 0,4–1,5 мкм/ч, что на порядок ниже скорости травления кремния в указанном растворе (рис. 1). Это позволяет рассчитать необходимую толщину маскирующего слоя, исходя из скоростей травления кремния и его оксида [4].

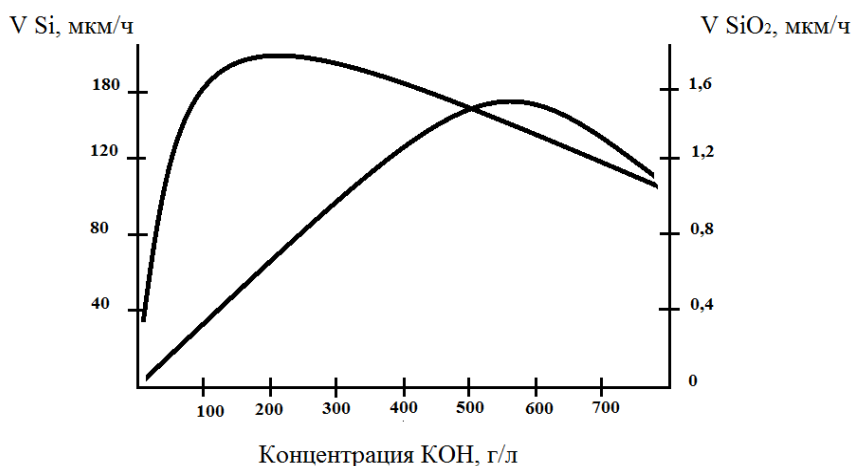


Рис. 1. Зависимость скорости травления кремния и оксида кремния от концентрации щелочи при температуре 370–371 К [4]

Оксид кремния SiO_2 чаще всего получают методом термического окисления кремниевых пластин. Такой диоксид может быть также использован как маска при сухом травлении толстых поликремниевых пленок, так как он химически устойчив к «сухой» химии травления поликремния. При анизотропном травлении кремния с ориентацией защитной маски, стороны которой ориентированы вдоль кристаллографического направления [100], кремний подтравливается под край маски на величину, равную глубине травления, при этом на кремниевой пластине может наблюдаться исходная маска из диоксида кремния, как представлено на рис. 2.

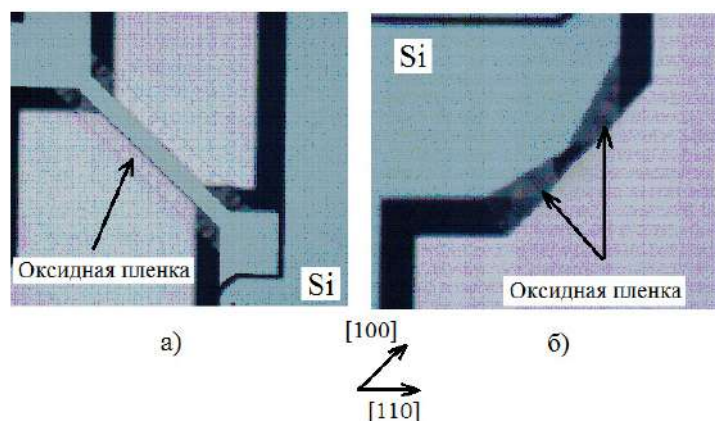


Рис. 2. Протравленные микроструктуры из кремния

Пленки нитрида кремния Si_3N_4 практически не травятся в растворах KOH , что также позволяет использовать их в качестве маскирующих слоев при глубинном травлении кремния. Кроме этого, пленки нитрида не травятся в растворах азотной и ортофосфорной кислот, которые могут быть использованы в промежуточных технологических операциях формирования кремниевых микроструктур.

Нитрид кремния Si_3N_4 , помимо защитных маскирующих покрытий, применяется в качестве диэлектрического слоя, пассивирующих слоев. Обычно используют два метода осаждения нитрида кремния – осаждение при низком давлении (*LPCVD – low pressure chemical vapour deposition*) и осаждение, усиленное плазмой (*PECVD – plasma-enhanced chemical vapour deposition*). Пленки нитрида, полученные *PECVD*-методом, имеют, как правило, нестехиометрический состав и могут содержать значительные концентрации водорода, что увеличивает пористость пленок. В силу этого снижается их стойкость в растворах плавиковой кислоты HF , применяемой в технологических процессах, однако такие пленки характеризуются внутренним совершенством, почти не имеют внутренних напряжений и могут использоваться в конструктивно-технологических решениях датчиков, предполагающих инкапсуляцию и упаковку микроструктур. Пленки нитрида, полученные *LPCVD*-методом, весьма устойчивы к воздействию химических веществ, что делает выбор этого материала привлекательным в технологии объемной микрообработки кремния в качестве маскирующего слоя [5, 6].

Указанные маскирующие слои используются и в технологии производства интегральных микросхем (ИМС), технологии создания которых хорошо отработаны. Несмотря на это, в технологии датчиков при формировании защитных маскирующих покрытий существует проблема их стойкости к химическим веществам и растворам, применяемым в технологических процессах изготовления, что связано с необходимостью глубокого профилирования кремниевых пластин. В работе [7] сообщается о применении термически выращенного кремния при локальном травлении и возникающих сложностях при проведении процесса – низкая селективность скорости травления кремния по отношению к его оксиду значительно усложняет получение глубоких структур в пластинах кремния, эта проблема возрастает с увеличением диаметра и толщины пластин. В плазмохимических процессах формирования ЧЭ датчиков селективность травления одних материалов по отношению к другим зависит от параметров плазмы – частоты ВЧ-смещения, давления, концентрации газов в рабочей камере и пр. [8–11]. Процесс травления может влиять на материал маскирующего слоя. Например, при травлении в плазме элегаза SF_6 ряд маскирующих материалов может играть роль катализатора, высвобождая дополнительный фтор, что отрицательно влияет на параметры процесса травления. В силу этого желателен выбор химически нейтрального по отношению к травящему газу материала [12]. В случае с SF_6 таким материалом может являться диоксид кремния. При анизотропном профилировании пластин кремния в щелочных растворах предъявляются высокие требования к технологическому процессу, заключающиеся в высоких требованиях к селективности маски по отношению к кремнию (не менее 300), а также к равномерности травления по пластине [13, 14].

Комбинированная защитная маска

Известно, что селективность травления, или избирательное травление – это травление преимущественно одного материала по сравнению с другим, который обладает гораздо меньшей скоростью травления. На основе этого, используя свойства материалов, возможна комбинация

защитных маскирующих покрытий, позволяющая создавать на поверхности кремниевых пластин сложные защитные маски. Это особенно актуально при формировании микроструктур сложного профиля, которые можно сформировать с применением комбинированной защитной маски (рис. 3).

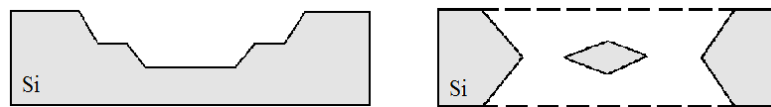


Рис. 3. Кремниевые микроструктуры сложного профиля

Формирование защитных слоев на пластине возможно после каждой технологической операции, но при этом формирование топологии маски методами фотолитографии невозможно после глубокого травления кремния. Допустимая глубина для дальнейшего литографического переноса структуры маски на профилированной пластине зависит от доступных технологических возможностей и требуемой точности формирования рисунка маски. Как правило, после травления кремния на глубину не более 10 мкм защитная маска удаляется, при этом обрабатываемая пластина может рассматриваться как плоская. В случае, когда пластина травится на большие глубины, необходима комбинированная маска, состоящая из нескольких слоев, каждый из которых имеет свою сформированную топологию. Это связано с тем, что профилированная пластина имеет глубокие рельефы, на которых затруднены операции нанесения фоторезиста и проведение процессов фотолитографии.

При травлении кремния каждый слой комбинированной маски действует последовательно, такая маска должна быть сформирована на поверхности кремниевой пластины до начала операций травления. Для каждого слоя маски возможен различный материал. Необходимы, по крайней мере, два селективно удаляемых материала. Последовательное открытие окон под травление путем выборочного селективного удаления защитных слоев и травление кремния между операциями удаления слоев создают серию углублений в кремнии промежуточной глубины. Защитные слои должны быть нанесены на пластину последовательно, методами фотолитографии в каждом из защитных слоев селективно открывают окна к кремнию. Каждое окно в каждом защитном слое действует во время всех последующих операций травления. Как правило, окно под травление в последующем слое больше, чем в предыдущем. Таким образом, последний защитный слой действует как первая маска при травлении кремния и т.д.

Известен ряд технологических решений, направленных на формирование в объеме кремниевой подложки микроструктур сложного профиля с использованием комбинированной защитной маски.

Например, на кремниевой пластине создают первый защитный маскирующий слой, представляющий собой пленку термически выращенного оксида кремния. Проводят операцию фотолитографии, заключающуюся в нанесении фоторезиста, экспонировании через фотошаблон, проявлении и термообработке до появления кремния в области максимальной глубины структуры (рис. 4).

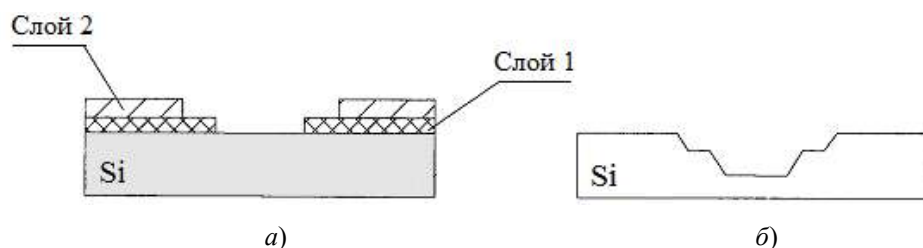


Рис. 4. Формирование микроструктуры сложного профиля:
а – формирование маскирующих слоев на кремниевой пластине;
б – полученная микроструктура сложного профиля

После этого на первый защитный маскирующий слой наносят второй маскирующий слой из материала, при химической обработке селективного по отношению к оксиду кремния. Методами фотолитографии формируют топологию второго защитного слоя. В травителях, не реагирующих или плохо реагирующих с маскирующим слоем оксида кремния и вторым маскирующим слоем, вытравливают кремний до промежуточной глубины. Таким травителем может

являться водный раствор гидроксида калия КОН. Затем, чередуя травление первого маскирующего слоя и кремния, получают заданный профиль. Данное техническое решение позволяет повысить точность изготовления профилированных кремниевых структур и повысить технологичность изготовления за счет применения комбинации защитных маскирующих слоев, химически селективных по отношению друг к другу.

Заключение

Процесс создания топологии защитных покрытий на поверхности кремниевых пластин при глубоком анизотропном травлении кремния является важной технологической операцией формирования кристаллов чувствительных элементов микромеханических датчиков. Применяя комбинированные защитные маски, состоящие как минимум из двух химически селективных защитных слоев, возможно формирование кремниевых микроструктур, имеющих сложный профиль травления. Это позволяет повысить технологичность изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков за счет формирования топологии маски на поверхности кремниевых пластин, что приводит к повышению качества изготовления и позволяет создавать новые структуры чувствительных элементов датчиков. Датчики ИИС, использующие данные структуры, могут находить применение в ракетно-космической отрасли, а именно: в системах бортовых измерений, электропитания и обеспечения работоспособности бортовой аппаратуры, ориентации и управления двигателем.

Список литературы

1. Люцко К. С., Гайкевич Д. Н. МЭМС-датчики давления // Приборостроение – 2023 : сб. докл. 16-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2023. С. 408–409.
2. Лысенко И. Е., Ежова О. А. Исследование влияния параметров элементов подвесов на собственную частоту конструкции микромеханического сенсора линейных ускорений // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 6. С. 386–388.
3. Пауткин В. Е., Прилуцкая С. В. Геометрическое стоп-травление в технологии микроэлектромеханических систем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 4. С. 50–54.
4. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств : справочник. М. : Радио и связь, 1991. 528 с.
5. Monk D. J., Soane D. S., Howe R. T. Enhanced Removal of Sacrificial Layers for Silicon Surface Micromachining // Technical Digest : the 7th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Yokohama, Japan, 1993. P. 280–283.
6. French P. J., Sarro P. M., Mallee R. [et al.]. Optimization of a Low-Stress Silicon Nitride Process for Surface Micromachining Applications // Sensors and Actuators. 1997. № A 58. P. 149–157.
7. Веселов Д. С., Воронов Ю. А. Особенности применения жидкостного травления кремния в технологии изготовления МЭМС-структур // Датчики и системы. 2016. № 4. С. 26–28.
8. Li Y. X., French P. J., Wolffenbuttel R. F. Selective reactive ion etching of silicon nitride over silicon using CHF₃ with N₂ addition // Vacuum Science and Technology. 1995. № B 13. P. 2008–2012.
9. Абдуллаев Д. А., Зайцев А. А., Кельм Е. А. Селективное плазмохимическое травление нитрида кремния относительно оксида кремния // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 2. С. 17–19.
10. Байдакова Н. А., Вербус В. А., Морозова Е. Е. [и др.]. Селективное травление Si, SiGe и Ge и использование его для повышения эффективности кремниевых солнечных элементов // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, вып. 12. С. 1599–1604.
11. Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. Ч. 1. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. 397 с.
12. Legtenberg R., Jansen H., de Boer M., Elwenspoek M. Anisotropic Reactive Ion Etching of Silicon Using SF₆/O₂/CHF₃ Gas Mixtures // Electrochemical Society. 1995. Vol. 142, № 6. P. 2020–2028.
13. Соколов Л. В., Жуков А. А., Парфенов Н. М., Ануров А. Е. Анализ современных технологий объемного микропрофилирования кремния для производства чувствительных элементов датчиков и МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 27–35.
14. Соколов Л. В., Парфенов Н. М. Технологические особенности формирования трехмерных МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 19–26.

References

1. Lyutsko K.S., Gaykevich D.N. MEMS pressure sensors. *Priboroostroenie–2023: sb. dokl. 16-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Instrument engineering–2023 : collection of the 16th International scientific and technical conf.* Minsk, 2023:408–409. (In Russ.)
2. Lysenko I.E., Ezhova O.A. Investigation of the effect of suspension element parameters on the natural frequency of a micromechanical linear acceleration sensor design. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering.* 2016;18(6):386–388. (In Russ.)

3. Pautkin V.E., Prilutskaya S.V. Geometric stop etching in microelectromechanical systems technology. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2017;(4): 50–54. (In Russ.)
4. Gotra Z.Yu. *Tekhnologiya mikroelektronnykh ustroystv: spravochnik = Technology of microelectronic devices: reference book.* Moscow: Radio i svyaz', 1991:528. (In Russ.)
5. Monk D.J., Soane D.S., Howe R.T. Enhanced Removal of Sacrificial Layers for Silicon Surface Micromachining. *Technical Digest : the 7th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators.* Yokohama, Japan, 1993:280–283.
6. French P.J., Sarro P.M., Mallee R. et al. Optimization of a Low-Stress Silicon Nitride Process for Surface Micromachining Applications. *Sensors and Actuators.* 1997;(A 58):149–157.
7. Veselov D.S., Voronov Yu.A. Features of the application of liquid etching of silicon in the manufacturing technology of MEMS structures. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2016;(4):26–28. (In Russ.)
8. Li Y.X., French P.J., Wolffenbuttel R.F. Selective reactive ion etching of silicon nitride over silicon using CHF₃ with N₂ addition. *Vacuum Science and Technology.* 1995;(B 13):2008–2012.
9. Abdullaev D.A., Zaytsev A.A., Kel'm E.A. Selective plasmochemical etching of silicon nitride relative to silicon oxide. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering.* 2014;(2):17–19. (In Russ.)
10. Baydakova N.A., Verbus V.A., Morozova E.E. et al. Selective etching of Si, SiGe and Ge and its use to increase the efficiency of silicon solar cells. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors.* 2017;51(12):1599–1604. (In Russ.)
11. Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Reveleva M.A. *Tekhnologiya, konstruktssii i metody modelirovaniya kremnievykh integral'nykh mikroskhem: v 2 ch. = Technology, designs and modeling methods of silicon integrated circuits: in 2 parts.* Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007;(part 1):397. (In Russ.)
12. Legtenberg R., Jansen H., de Boer M., Elwenspoek M. Anisotropic Reactive Ion Etching of Silicon Using SF₆/O₂/CHF₃ Gas Mixtures. *Electrochemical Society.* 1995;142(6):2020–2028.
13. Sokolov L.V., Zhukov A.A., Parfenov N.M., Anurov A.E. Analysis of modern technologies of volumetric microprofiling of silicon for the production of sensitive elements of sensors and MEMS. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering.* 2014;(10):27–35. (In Russ.)
14. Sokolov L.V., Parfenov N.M. Technological features of the formation of three-dimensional MEMS. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering.* 2011;(11):19–26. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анна Антоновна Филатова

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nsmvaa@gmail.com

Anna A. Filatova

Design engineer,
Scientific-Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Валерий Евгеньевич Пауткин

кандидат технических наук, начальник отдела,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: pautkin_ve@niifi.ru

Valeriy E. Pautkin

Candidate of technical sciences,
head of department,
Scientific-Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Дмитрий Владиславович Тразанов

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: dtrazanov00@mail.ru

Dmitriy V. Trazanov

Design engineer,
Scientific-Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 20.04.2025

Принята к публикации/Accepted 14.05.2025

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО РОБОТА

М. А. Щербаков¹, Н. В. Азарнов², С. Д. Кашицын³, А. П. Кушнир⁴, А. М. Володина⁵

^{1,2,3} Научно-производственное предприятие «Исток» имени Шокина, Фрязино, Московская обл., Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет (филиал в г. Фрязино), Фрязино, Московская обл., Россия

^{4,5} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹ mashcherbakov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ sedkashitsyn@istokmw.ru,

⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ akholopova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современное производство развивается в соответствии с шестью направлениями Индустрии 4.0. Рассмотрены два из них – PLM (Product Lifecycle Management) и Smart Factory как концепции, которые неразрывно связаны с понятием «цифровой двойник». Актуальность данной технологии, как показано в работе, обусловлена важностью цифровой трансформации в отрасли логистики и ее влиянием на конкурентные преимущества перед другими предприятиями. Целью работы является прогнозирование параметров состояния мобильного робота на основе формирования информационных связей между цифровым двойником и физическим объектом. *Материалы и методы.* Исследования основываются на взаимодействии MES/APS систем (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) в сочетании с IIoT (Industrial Internet of Things), мобильными роботами, а также методами динамического моделирования. *Результаты.* Разработаны имитационные модели приводов мобильного промышленного робота, предложены алгоритмы взаимодействия между цифровым двойником и физическим объектом. *Выводы.* Предложенный способ интеллектуального управления и мониторинга позволяет повысить надежность работы MES-системы на основе прогнозирования параметрических отказов мобильного робота.

Ключевые слова: цифровое производство, цифровой двойник, интернет вещей, автономный робот, логистика, привод, аккумуляторная батарея, старение, мониторинг, SimInTech, CALS-технологии

Для цитирования: Щербаков М. А., Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Кушнир А. П., Володина А. М. Цифровой двойник мобильного транспортного робота // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 52–66. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-7

THE DIGITAL TWIN OF A MOBILE TRANSPORT ROBOT

M.A. Shcherbakov¹, N.V. Azarnov², S.D. Kashitsyn³, A.P. Kushnir⁴, A.M. Volodina⁵

^{1,2,3} Research and Production Enterprise "Istok" named after A.I. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russia

³ MIREA – Russian Technological University (Fryazino branch), Fryazino, Moscow region, Russia

^{4,5} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹ mashcherbakov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ sedkashitsyn@istokmw.ru,

⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ akholopova@mail.ru

Abstract. *Background.* Modern production is developing in accordance with the six directions of Industry 4.0. This article discusses two of them – PLM (Product Lifecycle Management) and Smart Factory as concepts that are inextricably linked with the concept of «digital twin». The relevance of this technology, as shown in, is due to the importance of digital transformation in the logistics industry and its impact on competitive advantages over other enterprises. The purpose of the work is to predict the parameters of the state of a mobile robot based on the formation of information links between a digital twin and a physical object. *Materials and methods.* The research is based on the interaction of MES/APS systems (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) in combination with IIoT (Industrial Internet of Things), mobile robots, as well as dynamic modeling methods. *Results.* Simulation models of mobile industrial robot drives have been developed, and algorithms for interaction between a digital twin and a physical object have been proposed. *Conclusions.* The proposed method of intelligent control and monitoring makes it possible to increase the reliability of the MES system based on predicting parametric failures of a mobile robot.

Keywords: digital production, digital twin, Internet of Things, autonomous robot, logistics, drive, battery, aging, monitoring, SimInTech, CALS technologies

For citation: Shcherbakov M.A., Azarnov N.V., Kashitsyn S.D., Kushnir A.P., Volodina A.M. The digital twin of a mobile transport robot. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):52–66. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-7

Введение

Среди приоритетных направлений стратегии научно-технологического развития Российской Федерации особое внимание уделяется развитию информационно-телекоммуникационных систем и робототехнических комплексов, что подчеркивает их значимость в рамках приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ. В данном контексте актуальной задачей является разработка и внедрение цифровых двойников мобильных роботов, которые играют ключевую роль в цифровизации производства [1, 2].

Цифровые двойники мобильных роботов позволяют создавать автономные транспортные системы, обеспечивающие повышение эффективности производственных процессов за счет внедрения новых методов и средств механизации, автоматизации, роботизации и цифровизации. Это способствует снижению трудоемкости, повышению производительности и экономичности производства, а также решению задач, связанных с обеспечением надежности и экологической безопасности окружающей среды. Таким образом, развитие технологий цифровых двойников мобильных роботов является важным шагом на пути к созданию интеллектуальных производственных систем нового поколения.

Под объектом исследования будем предполагать логистические внутрицеховые операции. В качестве предмета исследования принят мобильный транспортный робот с установленным на нем коботом, исследование создания которого проводится в рамках развития «Передовой инженерной школы СВЧ-электроники» на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Разработка модели

Одной из важнейших функций MES-системы является мониторинг технологических процессов и оборудования, в частности, мобильного транспортного робота [3–5]. Модель взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом (мобильным транспортным роботом) с учетом концепции PLM может быть представлена в виде структурной схемы, приведенной на рис. 1.

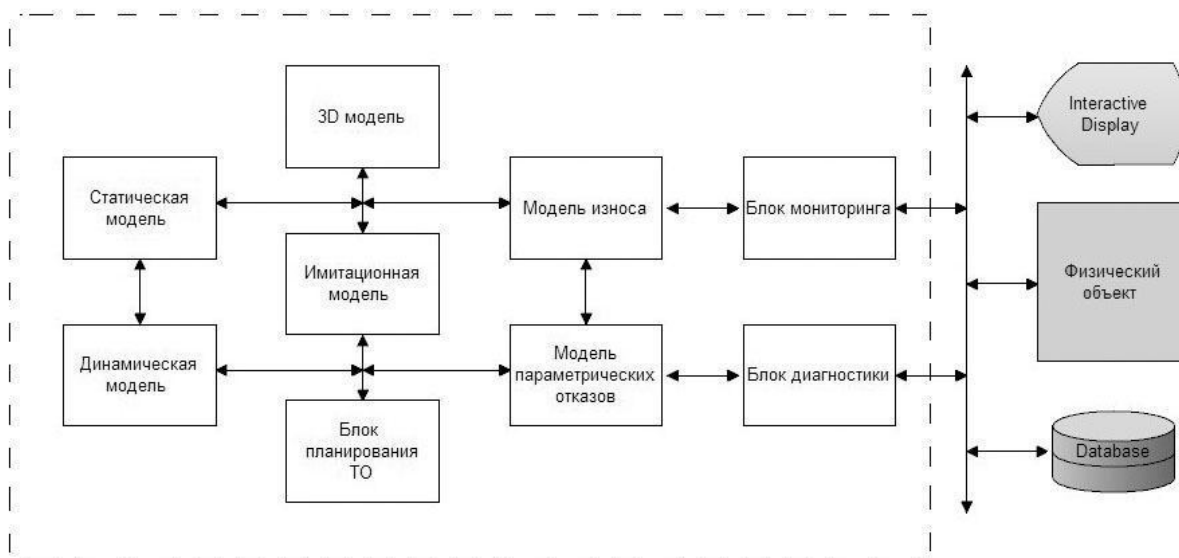


Рис. 1. Модель взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом

Особенностью данной модели является применение CALS-технологий (*Continuous Acquisition and Life cycle Support*), т.е. управление логистическим процессом с учетом жизненного цикла изделия. В этой связи данная модель может быть использована для прогнозирования состояния мобильного робота на основе взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом.

Исходя из намеченной цели, для формирования виртуального объекта были сформулированы следующие задачи:

- 1) построение имитационной модели цифрового двойника мобильного робота;
- 2) разработка модели отказа;
- 3) разработка информационной модели взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом.

Рассмотрим более подробно первую задачу. Для ее решения необходимо проанализировать особенности конструкции мобильного робота и, в первую очередь, определить типы приводов.

Для управления роботами применяют практически все известные типы приводов. Относительно дешевым, простым и надежным является пневматический привод, нашедший применение среди серийно выпускаемых роботов в объеме 20...30 %. По данным работы [6], «эти приводы плохо управляемы и поэтому используются в основном как нерегулируемые с цикловым управлением. Пневматические приводы характеризуются высокими скоростями перемещений элементов робота, поэтому для снижения скорости в роботах с цикловым управлением применяются демпферы». На самом деле это не так. Пневматические приводы не обязательно имеют высокие скорости перемещения и могут быть настроены практически на любую скорость (вплоть по «ползучей») даже в разомкнутых системах управления. Кроме того, пневмоприводы можно достаточно просто регулировать как по скорости, так и по положению на основе следящих систем с обратной связью. Не совсем верным является также утверждение, что для снижения высоких скоростей в роботах с цикловым управлением применяют демпферы. Для снижения скорости в пневмосистемах обычно используют дроссели и другие регулирующие клапаны, а демпферы служат лишь для торможения штока, причем только в конце рабочего хода [7, 8].

Примерно одна треть всех промышленных роботов оснащена гидравлическими приводами. Данные системы хоть и являются более сложными и дорогими по сравнению с пневматическими и электрическими, однако они обладают наилучшими массогабаритными характеристиками, способны развивать практически неограниченные усилия и крутящие моменты, поэтому являются основным типом привода для тяжелых и сверхтяжелых роботов [9, 10]. Гидравлические приводы хорошо управляются, поэтому они также нашли применение в роботах средней грузоподъемности, для которых требуются высококачественные динамические характеристики [11, 12].

Наибольшее распространение в приводах роботов (40...50 %) получил электрический привод как переменного [13], так и постоянного тока благодаря хорошей управляемости, простоте подвода энергии, высокому КПД и удобстве эксплуатации [14].

В промышленных роботах нашли применение электроприводы, в которых используют двигатели постоянного тока – традиционные коллекторные и бесколлекторные (вентильные), асинхронные двигатели (как нерегулируемые, так и с частотным управлением), шаговые двигатели, электромагниты (соленоиды и др.) [15–18].

С учетом того, что предметом исследования является мобильный транспортный робот [19], можно ограничить число возможных типов приводов, которые могут быть использованы в устройствах данного назначения. В частности, применение пневмо- и гидропривода в мобильных устройствах хоть и является теоретически возможным, но, с точки зрения практической реализации, является нежелательным вследствие значительного усложнения конструкции, так как этот способ требует наличия автономной системы подачи сжатого воздуха или масла под избыточным давлением в каждом автономном роботе.

Использование асинхронных или синхронных приводов в мобильных роботах также является технически сложным из-за того, что для их работы необходим высоковольтный источник переменного тока. Существуют драйверы шаговых двигателей с питанием от постоянного тока, однако сами шаговые двигатели (ШД) не могут быть использованы в качестве силового привода из-за невысокой развиваемой мощности. Выпускаемые серийно силовые ШД обычно комплектуются гидравлическими усилителями, что делает затруднительным их использование в составе мобильных роботов [20–22].

Таким образом, наиболее подходящим приводом мобильных роботов (в том числе комплексов, состоящих из мобильного транспортного робота с установленным на нем манипуляционным коботом) является привод постоянного тока, питание которого осуществляют от бортовой аккумуляторной батареи (АБ) (рис. 2).



Рис. 2. Схема энергопотребления мобильного робота

Недостатками такой системы являются электрохимическое старение АБ, а также ее разряда в процессе эксплуатации, что может привести к тому, что мобильный робот может остановиться в пути, не завершив очередной технологический цикл [23].

Для устранения этой опасности необходимо дать теоретическую оценку системы мобильного робота, оценить срок службы комплекса, создать систему прогнозирования отказа привода [24, 25].

Задача модели параметрического отказа по питанию состоит в оценке (прогнозировании) энергоемкости выполнения будущей технологической операции и сопоставлению ее значения с остаточным ресурсом (текущей емкостью) аккумуляторной батареи.

В качестве оценки состояния АБ используем показатель степени деградации *SOH* (*State of Health*), представляющий собой отношение текущей емкости АБ к первоначальной:

$$SOH = \frac{Q_t}{Q_0} 100 \%,$$

где Q_t – текущая емкость АБ; Q_0 – первоначальная емкость АБ.

Необходимым условием нормального завершения технологической операции является выполнение неравенства

$$Q_t \geq Q_{\min} + \Delta Q, \quad (1)$$

где ΔQ – прогнозируемое значение расхода емкости АБ на планируемую технологическую операцию.

Модель отказа учитывает степени деградации АБ (см. точки Q_0 и Q_t), а также текущее изменение емкости с учетом реальной и прогнозируемой нагрузок. Иллюстрация работы модели отказа и алгоритма взаимодействия цифрового двойника с мобильным роботом приведена на рис. 3, 4.

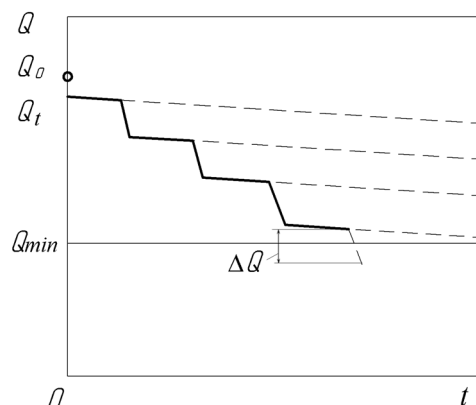


Рис. 3. Изменение остаточной емкости аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации мобильного робота

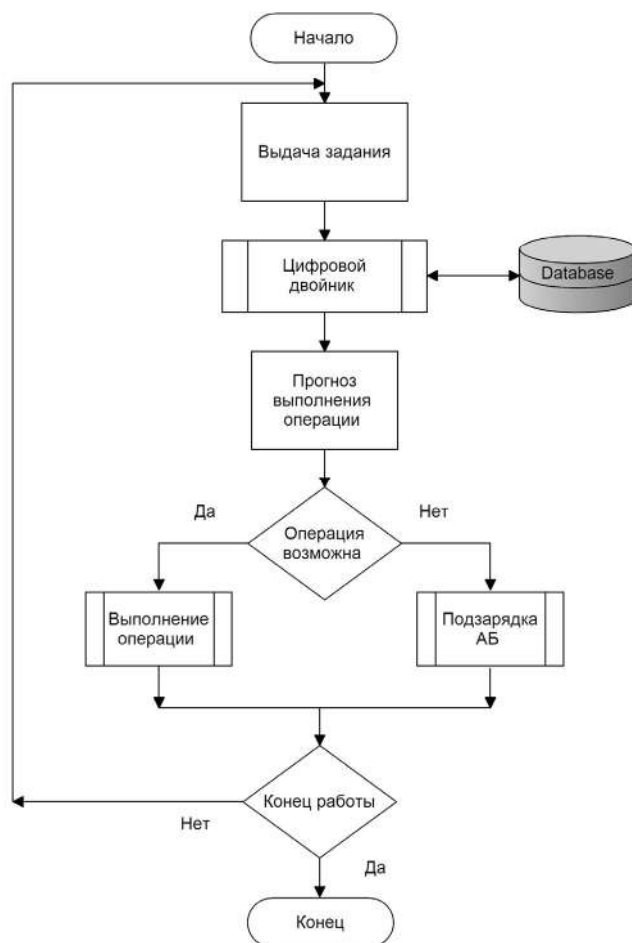


Рис. 4. Блок-схема алгоритма взаимодействия цифрового двойника с мобильным роботом

Рассчитать теоретически изменение емкости АБ при выполнении технологической логистической операции можно на основе затрат энергии, требуемой на перемещение мобильного робота и манипуляций кобота с грузом, однако данный расчет будет слишком неточным. Это объясняется тем, что при работе привода постоянного тока имеют место существенные потери энергии в процессе пуска двигателей, которые трудно учесть аналитически. В такие моменты пусковые токи могут на порядок превышать их номинальные значения, что, несомненно, скажется на текущей емкости АБ. Поэтому для более точных расчетов необходимо разработать имитационную модель привода [26].

Модель привода постоянного тока (в системе СИ) может быть представлена системой уравнений в операторной форме [27]:

$$\begin{cases} \langle u_B \rangle = T_B s \langle i_B \rangle + \langle i_B \rangle = (T_B s + 1) \langle i_B \rangle, \\ \langle u_A \rangle = (T_A s + 1) \langle i_A \rangle + \langle \omega \rangle \langle \Phi \rangle, \\ \langle \Phi \rangle = k \langle i_B \rangle, \\ s T_m \langle \omega \rangle = \langle i_A \rangle \langle \Phi \rangle - \langle M_H \rangle, \end{cases} \quad (2)$$

где u_B – напряжение на обмотке возбуждения двигателя; L_B – индуктивность цепи обмотки возбуждения; i_B – ток обмотки возбуждения; r_B – активное сопротивление цепи обмотки возбуждения; u_A – напряжение на якорной обмотке двигателя; L_A – индуктивность якорной цепи; i_A – ток якоря; r_A – активное сопротивление цепи якоря; e_A – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; k_e – коэффициент связи между скоростью и ЭДС; Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; k – коэффициент связи между током и потоком возбуждения; ω – скорость вращения вала двигателя; M – электромагнитный момент двигателя; M_H – момент сопротивления движению (момент нагрузки); J – суммарный (приведенный) момент инерции якоря и нагрузки; k_m – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом; $T_B = L_B / r_B$ – постоянная времени обмотки возбуждения; $T_A = L_A / r_A$ – постоянная времени цепи якоря; s – оператор Лапласа.

Система уравнений представлена в форме безразмерных параметров $\langle \rangle$, представляющих собой отношение абсолютной величины к номинальной, например:

$$\langle i_a \rangle = i_a / i_{a \text{ ном.}}$$

С точки зрения модели, входными воздействиями являются напряжения в цепях якоря и обмотки возбуждения, а также момент сопротивления движению (момент нагрузки). К независимым входным параметрам можно отнести также постоянные времени, значения которых определяются типоразмером привода и его конструктивными особенностями. К выходным переменным относятся электромагнитный момент двигателя и скорость вращения вала двигателя (ротора), а к параметрам состояния – переменные, определяющие токи в цепях якоря и обмотки возбуждения. Остальные коэффициенты, входящие в состав уравнений, являются параметрами, численные значения которых необходимо задать при проведении расчета.

Модель привода постоянного тока независимого возбуждения может быть реализована разными способами, например, в системе Matlab-Simulink как на элементах библиотеки Simulink (рис. 5), так и с использованием SimPowerSystems (библиотека Machines) (рис. 6).

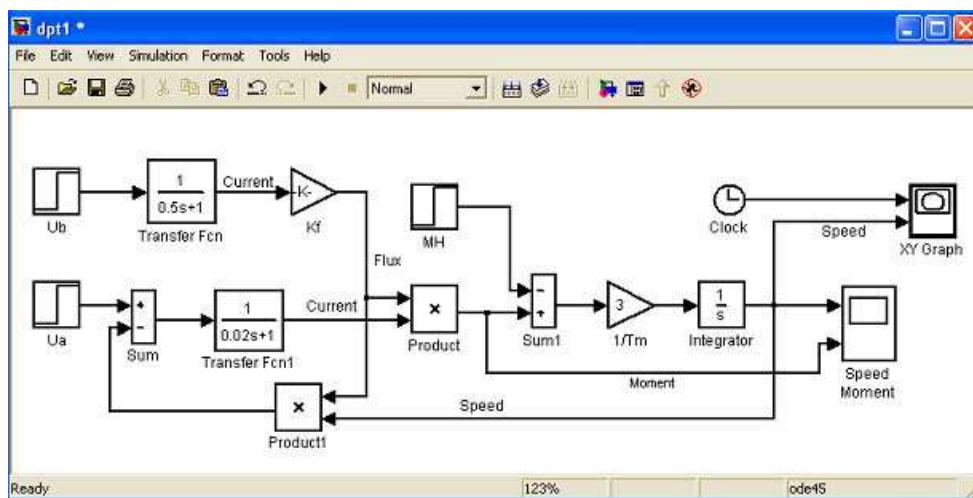


Рис. 5. Модель привода постоянного тока независимого возбуждения, построенная на элементах библиотеки Simulink: *current* – ток в цепи якоря; *speed* – угловая скорость ротора; *moment* – электромагнитный момент, развиваемый двигателем; *MH* – приведенный момент нагрузки; *Ub* – напряжение на обмотке возбуждения; *Ua* – напряжение на обмотке якоря; *Flux* – магнитный поток

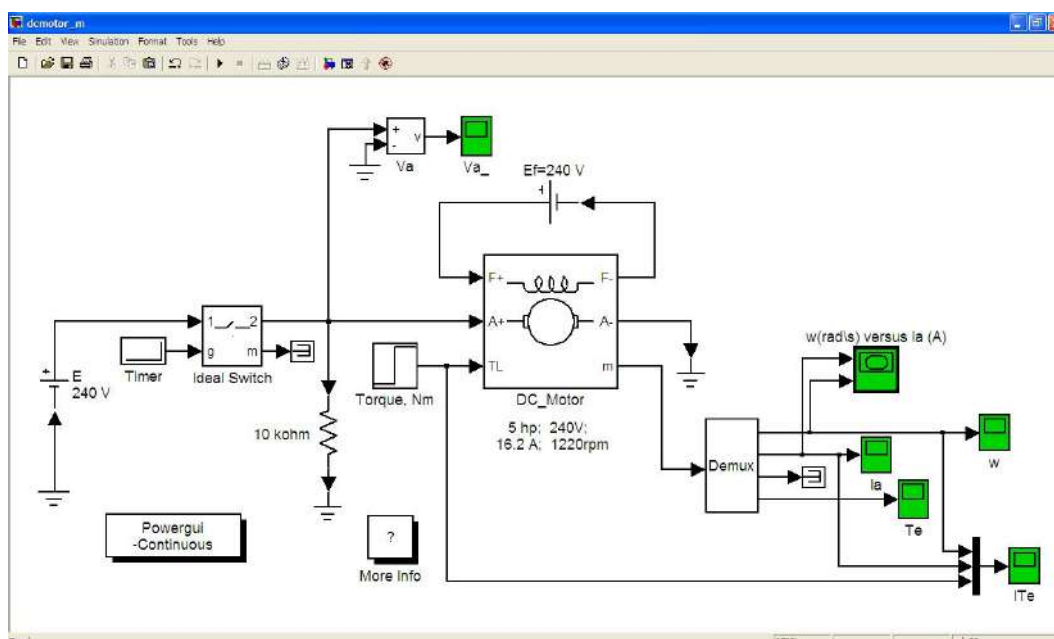


Рис. 6. Модель привода постоянного тока независимого возбуждения, построенная на элементах библиотеки SimPowerSystems

Результаты моделирования скорости и тока якоря привода постоянного тока независимого возбуждения от времени показаны на рис. 7, 8.

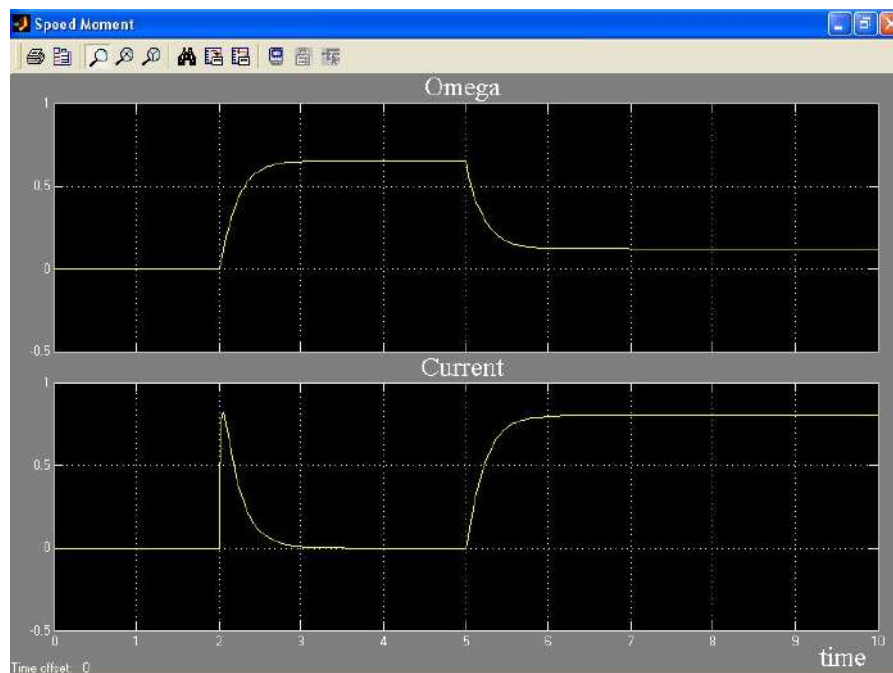


Рис. 7. Зависимость скорости (*omega*) и тока якоря (*current*) привода постоянного тока независимого возбуждения от времени модели Simulink

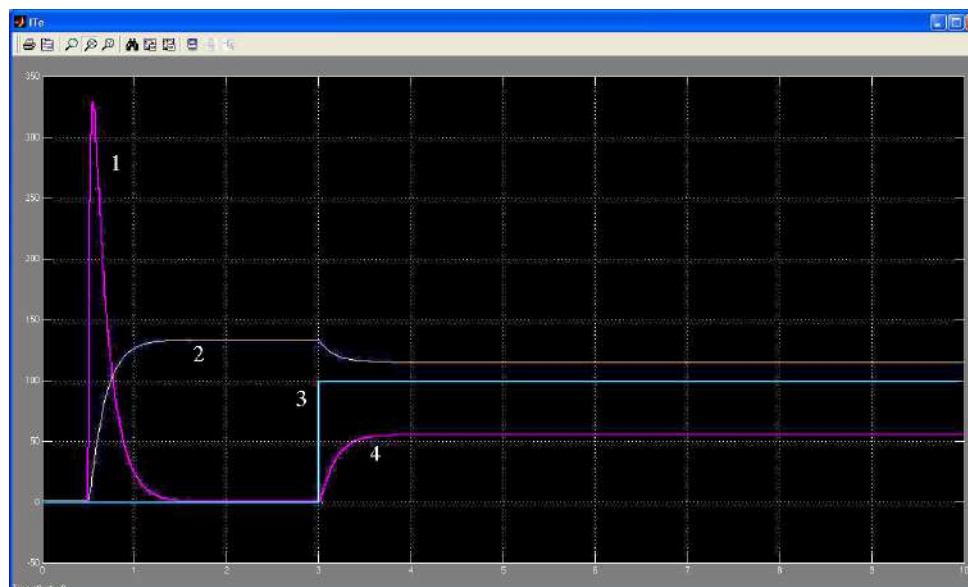


Рис. 8. Зависимость параметров привода модели SimPowerSystems от времени:

1 – пусковой ток якоря; 2 – угловая скорость ротора;
3 – приведенный момент нагрузки; 4 – ток якоря при нагрузке

Достаточно широкое распространение в последнее время получили приводы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов на редкоземельных металлах [28]. Данный тип двигателей является более дорогим, но имеет более высокий КПД и меньшую инерционность по сравнению с двигателями с обмотками возбуждения [29]. Система уравнений (1) в этом случае может быть упрощена и представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \langle u_a \rangle = (T_a s + 1) \langle i_a \rangle + \langle \omega \rangle \langle \Phi \rangle, \\ \langle \Phi \rangle = k, \\ s T_m \langle \omega \rangle = \langle i_a \rangle \langle \Phi \rangle - \langle M_n \rangle. \end{cases} \quad (3)$$

Схемы привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в Simulink и в отечественной среде динамического моделирования Simintech, полученная на основе системы уравнений (3), показаны на рис. 9, 10 соответственно.

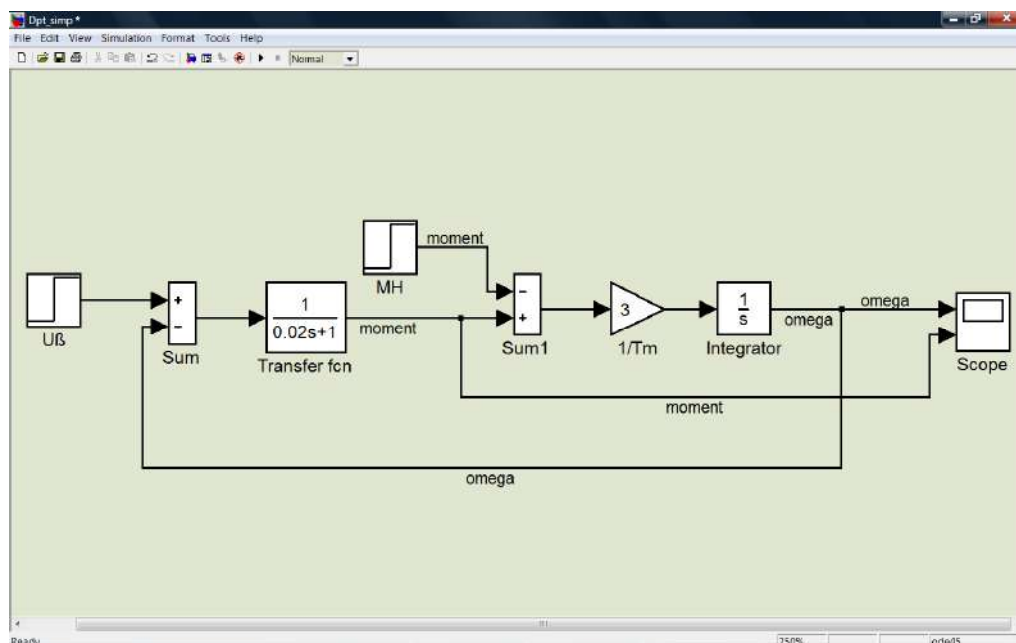


Рис. 9. Модель привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в системе Matlab-Simulink

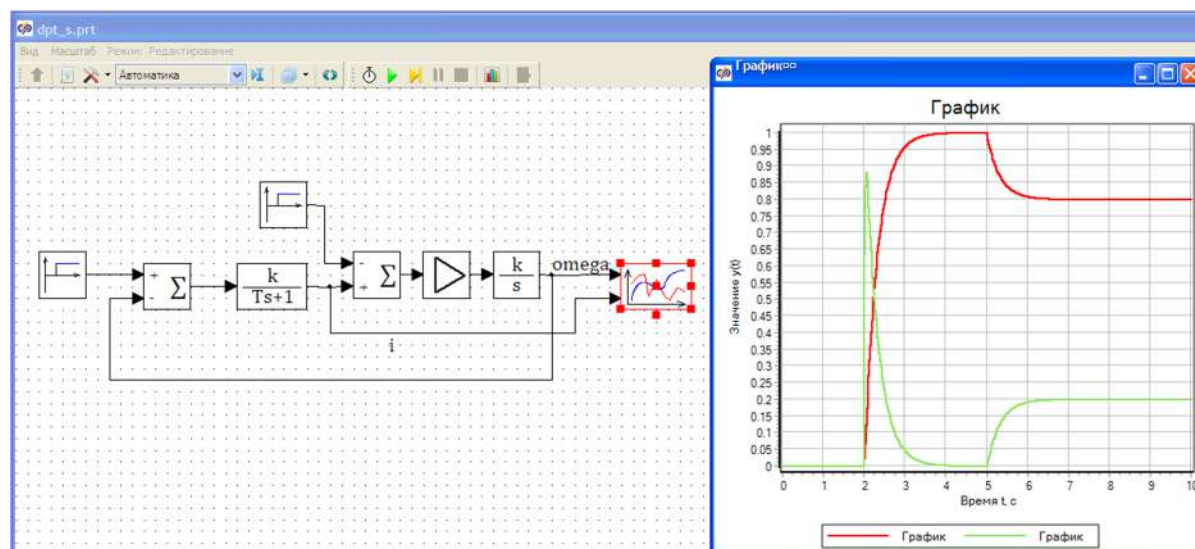


Рис. 10. Результаты моделирования по току якоря и крутящему моменту привода с постоянными магнитами

Как следует из рис. 10, результаты моделирования по току якоря и крутящему моменту привода с постоянными магнитами аналогичны результатам, приведенным на рис. 7, 8 для привода с независимой обмоткой возбуждения.

Для снижения пиковых значений пусковых токов в мощных силовых приводах часто применяют ступенчатый пуск. Моделирование привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в системе SimInTech с использованием ступенчатого пуска приведено на рис. 11.

Результаты моделирования показывают, что для получения точных оценочных данных по затратам энергии необходима интегрированная оценка изменения тока якоря от времени.

Модель, приведенная на рис. 12, позволяет прогнозировать нагрузку АБ в зависимости от заданного закона изменения приведенного крутящего момента нагрузки (рис. 13).

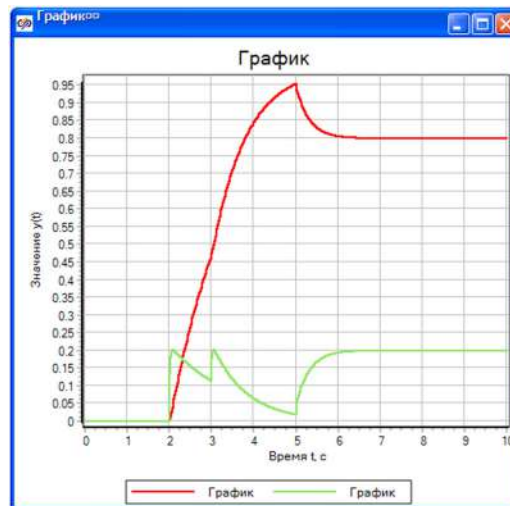


Рис. 11. Моделирование угловой скорости и тока якоря привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в системе SimInTech при ступенчатом пуске

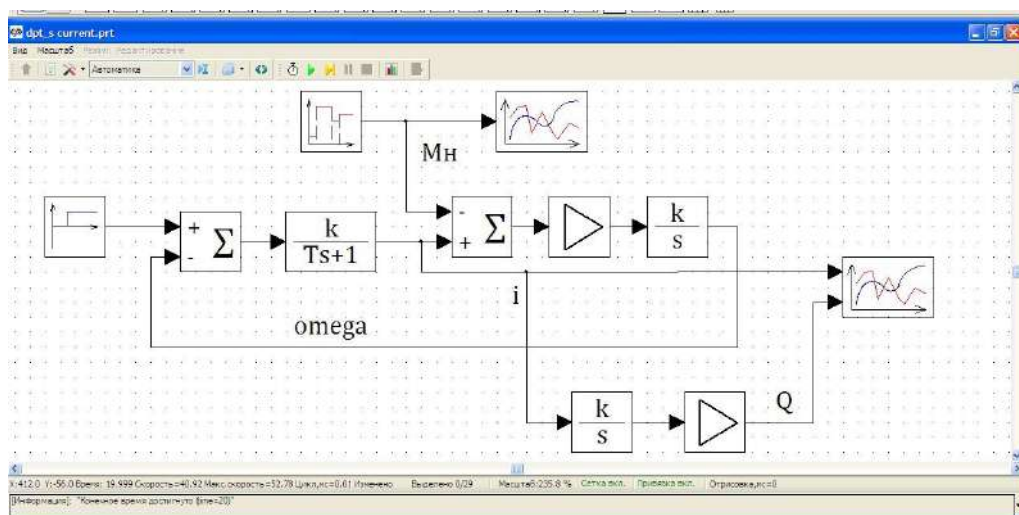
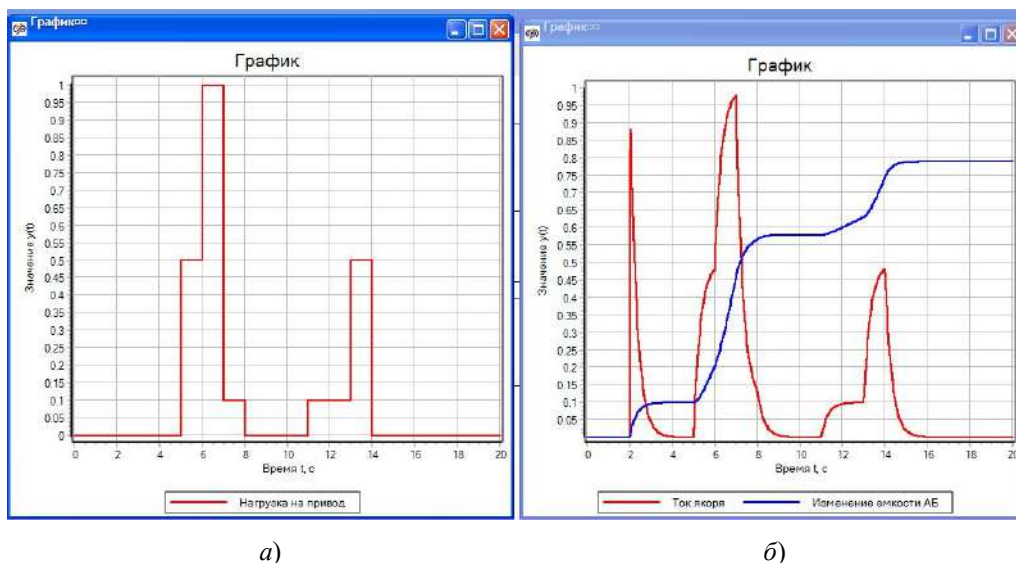


Рис. 12. Имитационная модель привода с программируемой нагрузкой и интегрированной оценкой тока якоря от времени



а)

б)

Рис. 13. Результаты моделирования привода постоянного тока при переменной нагрузке: а – приведенный крутящий момент нагрузки; б – график тока якоря и изменения емкости АБ

Для решения третьей задачи были разработаны информационные модели взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом.

Для промышленных автоматизированных систем, в которых используют такой широко распространенный стандарт, как OPC UA, был предложен инструментарий для сбора и интеграции технологической информации, получаемой от оборудования полевого уровня, в автоматизированную систему верхнего уровня путем агрегации данных и стандартизированного обмена данными для последующего анализа и обработки [30]. Программа, написанная на языке GO, позволяет организовать единое информационное пространство предприятия. Функционал разработанной программы обеспечивает создание клиента OPC UA, настройку и подключение к серверу, получение и обработку структуры хранения от OPC UA сервера, формирование подписки на изменение значений требуемых элементов структуры хранения, передачу полученных клиентом данных в специальный канал хранения.

Для получения, обработки, хранения и оценки технологической информации в режиме мягкого реального времени, обеспечения гибкости и масштабируемости в управлении данными может быть использован программный модуль, написанный на языке Lua [31].

Функционал модуля позволяет получать данные из различных источников, динамически создавать таблицы, функции и методы API, что обеспечивает конфигурирование технологического процесса, а также хранение и управление конфигурациями подключения к серверам, хранение метаданных технологических процессов на основе Дублинского ядра с использованием нормативно-справочной документации, осуществление унификации и анализ технологических данных.

Для создания клиента OPC UA сервера предлагается использовать функцию «SetupOPCUAConnection», алгоритм работы которой представлен на рис. 14. Для ее выполнения необходимо учитывать следующие входные параметры: «endpoint» (тип: строка): url, на котором работает OPC UA сервер необходимого технологического процесса.

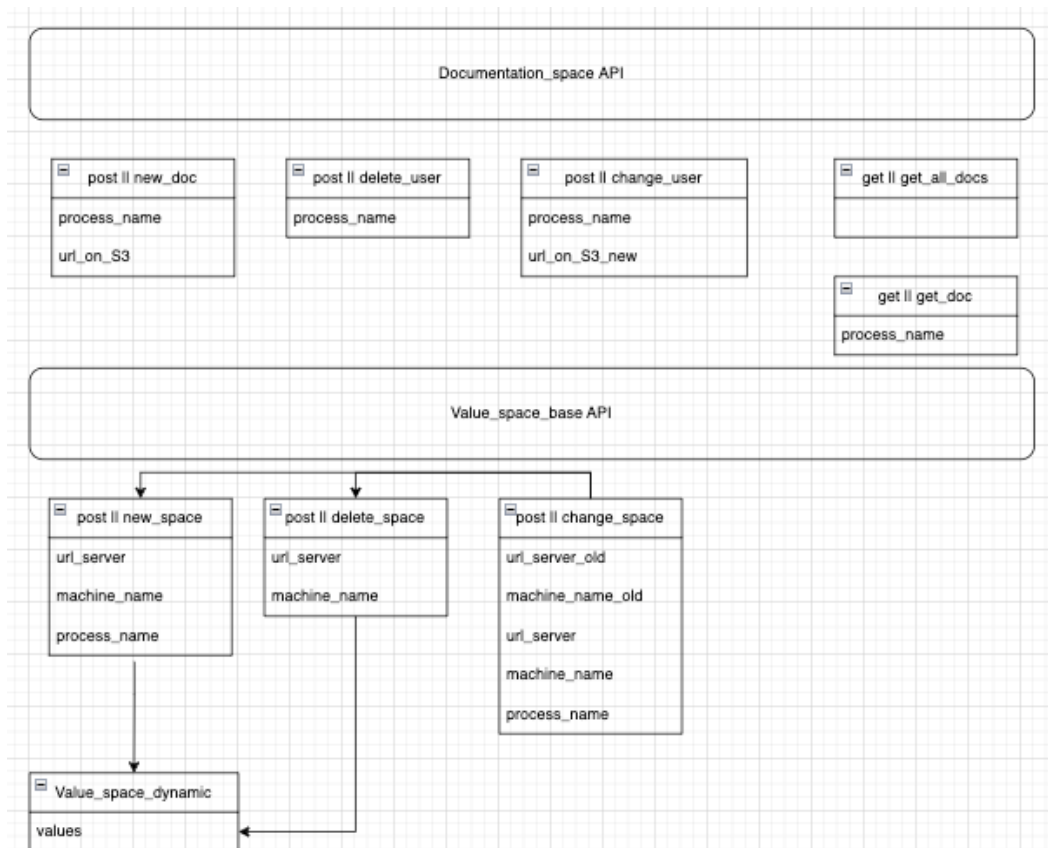


Рис. 14. Схема API по работе с динамическими таблицами и документацией

Логика работы состоит из следующих шагов:

- 1) инициализация переменных, необходимых для подключения к OPC UA серверу;
- 2) получение доступных url;

- 3) получение url подключения по текущим параметрам;
- 4) инициализация параметров подключения для создания клиента;
- 5) создание клиента OPC UA сервера;
- 6) подключение к OPC UA серверу;
- 7) функция возвращает клиента для работы с OPC UA сервером.

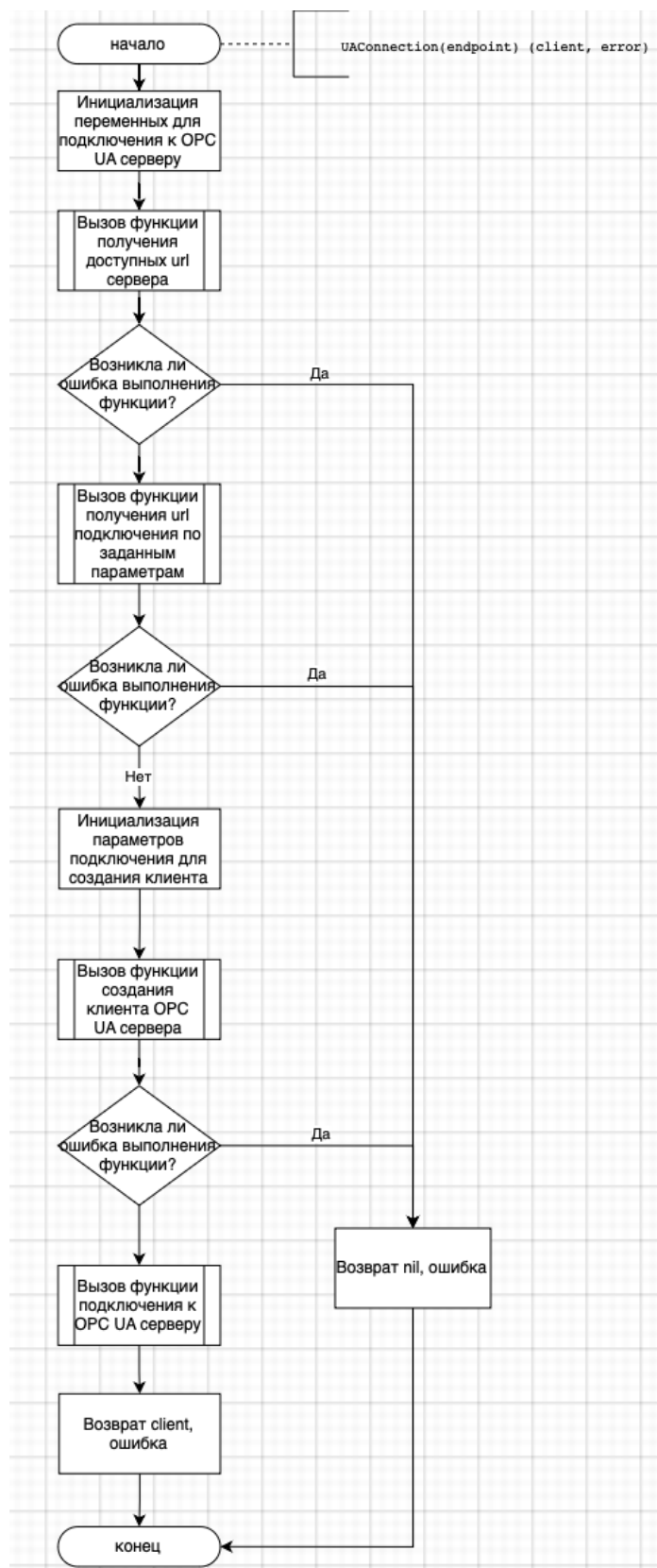


Рис. 15. Алгоритм функции «SetupOPCUAConnection»

Заключение

Результаты работы демонстрируют, что использование цифрового двойника позволяет повысить надежность работы MES-системы за счет прогнозирования параметрических отказов, таких как снижение емкости аккумуляторной батареи. Предложенная модель взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом, основанная на концепции PLM и CALS-технологиях, обеспечивает эффективное управление жизненным циклом мобильного робота и позволяет прогнозировать его состояние в реальном времени.

Разработанные алгоритмы и модели, реализованные в средах Matlab-Simulink и SimInTech, позволяют точно оценивать энергопотребление робота и прогнозировать его работоспособность в зависимости от текущего состояния аккумуляторной батареи. Это особенно важно для предотвращения остановки робота в процессе выполнения технологических операций из-за разрядки батареи.

Кроме того, предложенные решения по интеграции данных через OPC UA и использование программных модулей на языках GO и Lua обеспечивают гибкость и масштабируемость системы управления, что делает ее применимой в различных промышленных автоматизированных системах.

Список литературы

1. Кушнир А. П. Система мониторинга динамических параметров станков с ЧПУ // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения : сб. тез. Междунар. науч. конф., посвящ. 85-летию Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН / под ред. акад. Р. Ф. Ганиева. М. : ИМАШ РАН, 2023. 262 с.
2. Калинина Е. Цифровая трансформация в логистике: технология цифрового двойника // Technoeconomics. 2024. Vol. 3, № 3. Р. 48–56. doi: <https://doi.org/10.57809/2024.3.3.10.5>
3. Паршина И. С., Фролов Е. Б. Разработка цифрового двойника производственной системы на базе современных цифровых технологий // Russian Journal of Industrial Economics. 2020. Vol. 13, № 1. doi: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
4. Пат. РФ RU 2 680 755 C2. МПК G06F 15/16 (2006.01). Диспетчерская информационно-аналитическая система / Кушнир А. П., Холопов В. А., Каширская Е. Н. № 2017128646 ; заявл. 25.10.2018 ; опубл. 26.02.2019, Бюл. № 6.
5. Пат. RU 2 685 484 C1 МПК G05B 13/02 (2006.01). Киберфизическая система мониторинга высокотехнологического оборудования / Кушнир А. П. № 2018137868 ; заявл. 26.10.2018 ; опубл. 18.04.2019, Бюл. № 11.
6. Классификация приводов роботов. URL: <https://helpiks.org/4-72330.html?ysclid=m6m3jsauk961621196>
7. Кушнир А. П. Пневматические производственные системы : учеб. пособие. М. : РТУ МИРЭА, 2019. 78 с.
8. Филатов А. М., Точилкин В. В. Пневмопривод и пневмоавтоматика подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин : учеб. пособие для вузов. Магнитогорск : МГТУ, 2006. 187 с.
9. Автоматизация технологических процессов. Приводы промышленных роботов : справочник. URL: https://spravochnik.ru/avtomatizaciya_tehnologicheskikh_processov/privody_promyshlennyh_robotov/?ysclid=m6lyb8ynis540685849
10. Кушнир А. П. Цифровой двойник героторного мотора // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : сб. ст. VIII Междунар. науч. конф. (г. Москва, 19–21 ноября 2024 г.). М. : ИМАШ РАН, 2024.
11. Москвин В. К., Кузнецов П. М., Феофанов А. Н. Повышение точности позиционирования гидропривода промышленного робота // Технология машиностроения. 2020. № 8. С. 46–49.
12. Баранов А. В. Гидро- и пневмопривод в автоматизированном производстве : учеб. пособие для вузов. Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. 172 с.
13. Слепцов В. В., Мостовской М. В., Малышев И. Ю. [и др.]. Информационно-измерительная и управляющая система электропривода промышленных роботов-манипуляторов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 5–15. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-1
14. Махмуд Бассам Юнес. Совершенствование электроприводов роботов на основе фаззи – регуляторов и нейронных сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : Московский энергетический институт, 2008.
15. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб. : БХВ-Петербург, 2018. 284 с.
16. Бугров Ю. Н., Кушнир А. П., Киселев Д. С., Ву Хоанг Занг. Схемотехнический анализ широтно-импульсных и фазовых преобразователей в цифровых устройствах // Инновационные технологии в электронике и приборостроении : сб. докл. рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. М. : РТУ МИРЭА, 2021. Т. 2. С. 178–183.

17. Кушнир А. П., Ву Хоанг Занг. Автоматизация системы частотного управления на базе PLC и SCADA // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 7. С. 11–17.
18. Автоматизированный электропривод, робототехника и электроэнергетика : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию юбилею кафедры электропривода ЛГТУ. Липецк : ЛГТУ, 2024. 352 с.
19. Полтавский А. В., Григорьев А. В., Мельничук А. И., Избасов А. Г., Рыбаков И. М. Оптимизация моделей объектов информационно-измерительных и управляющих систем мобильных роботов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 28–38. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-4
20. CNC-технологии. URL: <https://cnc-tehnologi.ru/odnokanalnye-drajvery-shd/2dm556>
21. Шаговый привод. URL: <https://stepmotor.ru/catalog/shagovyi-privod>
22. Гибридные двигатели. URL: <https://electroprivod.ru/hybrid.htm>
23. Щуров Н. И., Дедов С. И., Штанг А. А. [и др.]. Моделирование процессов деградации литиевого аккумулятора самосвала с электрическим приводом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 10-1. С. 76–90.
24. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В. Теоретическая оценка метрологических характеристик информационно-измерительных и управляющих систем электропривода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 5–16. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1
25. Михайлов Е. А., Мищенко В. И., Пермяков А. П. Анализ существующих подходов к обоснованию срока службы метрологических комплексов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 40–45. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5
26. Урваев И. Н., Базыкин С. Н. Имитационное моделирование гидродинамических параметров подводного безэкипажного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 58–67. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7
27. Кушнир А. П. Киберфизические системы. М. : РТУ МИРЭА, 2023. 64 с.
28. Пат. RU 2 605 945 C1, МПК H02K 23/66. Устройство двигателя постоянного тока повышенной мощности с возбуждением от постоянных магнитов и электронной коммутацией коллекторных пластин / Дегтярев В. Б., Ширококов И. Н. № 2015135718 ; заявл. 24.08.2015 ; опубл. 10.01.2017.
29. Основы робототехники. Приводы промышленных роботов. URL: https://de.donstu.ru/CDO-Courses/AI/rabot_i_mehatr/206/lection4.html
30. А.с. Модуль сбора технологических данных на основе технологии OPC UA / Володина А. М., Черешнев Н. С. № 2024619795 ; опубл. 26.04.2024, Бюл. № 5.
31. А.с. Модуль управления и анализа технологической информации промышленных автоматизированных систем / Володина А. М., Левковец А. В. № 2024618580 ; опубл. 15.04.2024, Бюл. № 4.

References

1. Kushnir A.P. Monitoring system of dynamic parameters of CNC machines. *Mashiny, tekhnologii i materialy dlya sovremennogo mashinostroeniya: sb. tez. Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 85-letiyu Instituta mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN = Machines, technologies and materials for modern engineering : collection of technical data. International Scientific Conference, dedicated to 85th anniversary of the Blagonravov Institute of Machine Science of the RAS.* Moscow: IMASH RAN, 2023:262. (In Russ.)
2. Kalinina E. Digital transformation in logistics: technology of a digital twin. *Technoeconomics.* 2024;3(3):48–56. (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.57809/2024.3.3.10.5>
3. Parshina I.S., Frolov E.B. Development of a digital twin of a production system based on modern digital technologies. *Russian Journal of Industrial Economics.* 2020;13(1). (In Russ.). doi: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
4. Pat. Russian Federation RU 2 680 755 C2. MPK G06F 15/16 (2006.01). Dispatching information and analytical system. Kushnir A.P., Kholopov V.A., Kashirskaya E.N. № 2017128646; appl. 25.10.2018; publ. 26.02.2019, Bull. № 6. (In Russ.)
5. Pat. RU 2 685 484 C1 MPK G05B 13/02 (2006.01). Cyberphysical monitoring system for high-tech equipment. Kushnir A.P. № 2018137868; appl. 26.10.2018; publ. 18.04.2019, Bull. № 11. (In Russ.)
6. *Klassifikatsiya privodov robotov = Classification of robot drives.* (In Russ.). Available at: <https://helpiks.org/4-72330.html?ysclid=m6m3jsauk961621196>
7. Kushnir A.P. *Pnevmaticheskie proizvodstvennyye sistemy: ucheb. posobie = Pneumatic production systems: textbook.* Moscow: RTU MIREA, 2019:78. (In Russ.)
8. Filatov A.M., Tochilkin V.V. *Pnevmoprivod i pnevmootomatika pod"emno-transportnykh, stroitel'nykh i dorozhnykh mashin: ucheb. posobie dlya vuzov = Pneumatic drive and pneumatic automation of lifting, transport, construction and road vehicles: textbook for universities.* Magnitogorsk: MGUTU, 2006:187. (In Russ.)
9. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov. Privody promyshlennykh robotov: spravochnik = Automation of technological processes. Industrial robot drives: reference book.* (In Russ.). Available at: https://spravochnik.ru/avtomatizatsiya_tekhnologicheskikh_processov/privody_promyshlennykh_robotov/?ysclid=m6lyb8ynis540685849

10. Kushnir A.P. Digital twin of a gerotor motor. *Fundamental'nye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch. konf. (g. Moskva, 19–21 noyabrya 2024 g.) = Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering : collection of Articles VIII International Scientific Conference (Moscow, November 19–21, 2024)*. Moscow: IMASh RAN, 2024. (In Russ.)
11. Moskvina V.K., Kuznetsov P.M., Feofanov A.N. Improving the positioning accuracy of an industrial robot hydraulic drive. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of mechanical engineering*. 2020;(8):46–49. (In Russ.)
12. Baranov A.V. *Gidro- i pnevmoprivod v avtomatizirovannom proizvodstve: ucheb. posobie dlya vuzov = Hydraulic and pneumatic drive in automated production: textbook for universities*. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024:172. (In Russ.)
13. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V., Malyshev I.Yu. et al. Information-measuring and control system of electric drive of industrial robot manipulators. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(4):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-1
14. Makhmud Bassam Yunes. Improvement of electric drives of robots based on fuzzy controllers and neural networks: PhD abstract. Moscow: Moskovskiy energeticheskiy institut, 2008. (In Russ.)
15. Yurevich E.I. *Osnovy robototekhniki = Fundamentals of robotics*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2018:284. (In Russ.)
16. Bugrov Yu.N., Kushnir A.P., Kiselev D.S., Vu Khoang Zang. Circuit engineering analysis of pulse width and phase converters in digital devices. *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sb. dokl. ross. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem = Innovative technologies in electronics and instrument engineering : collection of reports of the Russian scientific and technical conference with international participation*. Moscow: RTU MIREA, 2021;2:178–183. (In Russ.)
17. Kushnir A.P., Vu Khoang Zang. Automation of PLC and SCADA-based frequency control systems. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial automated control systems and controllers*. 2021;(7):11–17. (In Russ.)
18. *Avtomatizirovanny elektroprirod, robototekhnika i elektroenergetika: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 50-letnemu yubileyu kafedry elektropriroda LGTU = Automated electric drive, robotics and electric power industry : collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 50th anniversary of the LGTU Electric Drive Department*. Lipetsk: LGTU, 2024:352. (In Russ.)
19. Poltavskiy A.V., Grigor'ev A.V., Mel'nichuk A.I., Izbasov A.G., Rybakov I.M. Optimization of models of objects of information-measuring and control systems of mobile robots. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(2):28–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-4
20. *CNC-tehnologii = CNC technology*. (In Russ.). Available at: <https://cnc-tehnologii.ru/odnokanalnye-drajvery-shd/2dm556>
21. *Shagovyy privod = Stepper drive*. (In Russ.). Available at: <https://stepmotor.ru/catalog/shagovyi-privod>
22. *Gibridnye dvigateli = Hybrid engines*. (In Russ.). Available at: <https://electroprirod.ru/hybrid.htm>
23. Shchurov N.I., Dedov S.I., Shtang A.A. et al. Modeling of the degradation processes of a lithium battery of an electric dump truck. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and Analytical Bulletin*. 2023;(10-1):76–90. (In Russ.)
24. Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Orlov V.P., Artemova S.V. Theoretical assessment of metrological characteristics of information-measuring and control systems of electric drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(1):5–16. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1
25. Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I., Permyakov A.P. Analysis of existing approaches to substantiating the service life of metrological complexes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;(4):40–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5
26. Urvaev I.N., Bazykin S.N. Simulation of hydrodynamic parameters of an underwater unmanned vehicle. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;(4):58–67. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7
27. Kushnir A.P. *Kiberfizicheskie sistemy = Cyberphysical systems*. Moscow: RTU MIREA, 2023:64. (In Russ.)
28. Pat. RU 2 605 945 C1, MPK H02K 23/66. The device of a high-power DC motor with excitation from permanent magnets and electronic switching of collector plates. Degtyarev V.B., Shirobokov I.N. № 2015135718; appl. 24.08.2015; publ. 10.01.2017. (In Russ.)
29. *Osnovy robototekhniki. Privody promyshlennykh robotov = Fundamentals of robotics. Industrial robot drives*. (In Russ.). Available at: https://de.donstu.ru/CDOCourses/AII/rabot_i_mehatr/206/lection4.html
30. A.s. Technological data collection module based on OPC UA technology. Volodina A.M., Chereshev N.S. № 2024619795; publ. 26.04.2024, Bull. № 5. (In Russ.)
31. A.s. Module of control and analysis of technological information of industrial automated systems. Volodina A.M., Levkovets A.V. № 2024618580; publ. 15.04.2024, Bull. № 4. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Максим Александрович Щербakov**

заместитель директора по цифровой трансформации,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: mashcherbakov@istokmw.ru

Maksim A. Shcherbakov

Deputy director of digital transformation,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Никита Владимирович Азарнов

инженер,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: nvazarnov@istokmw.ru

Nikita V. Azarnov

Engineer,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Сергей Дмитриевич Кашицын

администратор проектов,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а);
преподаватель,
МИРЭА – Российский технологический университет
(филиал в г. Фрязино)
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: sedkashitsyn@istokmw.ru

Sergey D. Kashitsyn

Project administrator,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia);
lecturer,
MIREA – Russian Technological University
(Fryazino branch)
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Александр Петрович Кушнир

кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленной информатики,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: 89169521579@ya.ru

Aleksandr P. Kushnir

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of industrial informatics,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Анна Михайловна Володина

старший преподаватель
кафедры промышленной информатики,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: akholopova@mail.ru

Anna M. Volodina

Senior lecturer of the sub-department
of industrial informatics,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.04.2025

Принята к публикации / Accepted 13.05.2025

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

Н. В. Азарнов¹, С. Д. Кашицын², А. П. Баринов³, А. Е. Ефимов⁴, П. О. Михайлов⁵^{1,2,3,4} Научно-производственное предприятие «Исток» имени Шокина, Фрязино, Московская обл., Россия² МИРЭА – Российский технологический университет (филиал в г. Фрязино), Фрязино, Московская обл., Россия⁵ Научно-производственное предприятие «Радиотехника», Москва, Россия⁵ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия¹ nvazarnov@istokmw.ru, ² sedkashitsyn@istokmw.ru, ³ apbarinov@istokmw.ru,⁴ aeefimov@istokmw.ru, ⁵ pm@npprt.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются основные аспекты построения систем пространственной ориентации и позиционирования наземных мобильных роботов с применением алгоритмов детектирования объектов. Целью работы является исследование возможности применения нейросетевых алгоритмов детектирования объектов в режиме реального времени для управления технологической транспортной платформой, выполняющей различные операции вне зданий. *Материалы и методы.* Применение в робототехнике специализированного программного обеспечения, созданного на базе программных продуктов и сред для разработки. *Результаты и выводы.* Представлен анализ наиболее подходящих нейросетевых алгоритмов детектирования объектов в режиме реального времени, позволяющих повысить качество детектирования объектов, делая системы более эффективными и точными.

Ключевые слова: робототехника, наземные мобильные роботы, адаптивные роботы, пространственная ориентация, позиционирование, навигация, управление

Для цитирования: Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Баринов А. П., Ефимов А. Е., Михайлов П. О. Система управления наземными мобильными роботами // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 67–72. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-8

CONTROL SYSTEM FOR GROUND MOBILE ROBOTS

N.V. Azarnov¹, S.D. Kashitsyn², A.P. Barinov³, A.E. Efimov⁴, P.O. Mikhailov⁵^{1,2,3,4} Research and Production Enterprise "Istok" named after A.I. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russia² MIREA – Russian Technological University (Fryazino branch), Fryazino, Moscow region, Russia⁵ Research and Production Enterprise "Radiotechnika", Moscow, Russia⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia¹ nvazarnov@istokmw.ru, ² sedkashitsyn@istokmw.ru, ³ apbarinov@istokmw.ru,⁴ aeefimov@istokmw.ru, ⁵ pm@npprt.ru

Abstract. *Background.* Considers the main aspects of constructing spatial orientation and positioning systems for ground-based mobile robots using object detection algorithms. The aim of the work is to study the possibility of using neural network object detection algorithms in real time to control a technological transport platform that performs various operations outside buildings. *Materials and methods.* Application in robotics of specialized software created on the basis of software products and environments for development in robotics. *Results and conclusions.* Presents an analysis of the most suitable neural network algorithms for detecting objects in real time, which improve the quality of object detection, making the systems more efficient and accurate.

Keywords: robotics, ground mobile robots, adaptive robots, spatial orientation, positioning, navigation, control

For citation: Azarnov N.V., Kashitsyn S.D., Barinov A.P., Efimov A.E., Mikhailov P.O. Control system for ground mobile robots. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):67–72. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-8

Введение

Развитие робототехники и автономных систем является одним из приоритетных направлений научно-технологического развития Российской Федерации. В этом контексте особую

актуальность приобретает разработка эффективных систем управления наземными мобильными роботами, способными выполнять задачи в условиях динамичной и неструктурированной среды. Одной из наиболее актуальных задач в этой области является разработка и внедрение систем управления мобильными роботами, которые становятся важным инструментом цифровой трансформации промышленности.

В рамках данной работы рассматриваются актуальные задачи, связанные с разработкой и совершенствованием алгоритмов детектирования объектов в режиме реального времени. Основное внимание уделяется исследованию нейросетевых методов, включая модели семейства YOLO и алгоритмы SLAM, таких как RTAB-Map. Эти технологии позволяют роботам точно идентифицировать окружающие объекты и строить карты пространства даже в условиях наличия динамических препятствий.

Важным аспектом исследования является оптимизация вычислительных ресурсов автономных платформ. На примере мобильного робота X3 на базе Raspberry Pi 4B анализируются компромиссы между точностью детектирования и производительностью системы. Особое внимание уделяется практическим аспектам внедрения, включая проблемы проскальзывания колес, коррекцию траектории движения и адаптацию к изменяющимся условиям окружающей среды.

Под объектом исследования будем предполагать логистические внутрицеховые операции. В качестве предмета исследования принят мобильный транспортный робот, исследование создания которого проводится в рамках развития «Передовой инженерной школы СВЧ-электроники» на базе АО «НПП "Исток" им. Шокина».

Принципы построения и архитектура систем управления роботом

Ниже представлены результаты тестирования системы локализации и навигации автономного колесного робота. В качестве опытного образца был использован робот X3 производителя Yahboom.

В составе робота имеются:

- RGB камера (разрешение 640×480, частота кадров 30);
- RGBD камера (разрешение 640×480, частота кадров 30);
- LiDAR A1, однолучевой лидар со сканированием на 360° (диапазон расстояний от 0,15 до 12 м) и частотой сканирования 10 Гц.

В качестве вычислительного центра робота выступает одноплатный компьютер Raspberry Pi 4B, обладающий:

- четырехъядерным процессором Cortex-A72;
- оперативной памятью 4 Гб LPDDR4-3200;
- USB-портами для подключения к периферийным устройствам (камера, лидар).

Был проведен анализ качества и скорости работы алгоритмов локализации: RTAB-Map (RGBD+LiDAR режим).

Также был проведен анализ нейросетевых алгоритмов детектирования объектов в режиме реального времени, работающих в различных средах разработки:

- среда Darknet, DNN OpenCV (модели YoloV3tiny, YoloV4tiny, YoloV4);
- среда PyTorch (модели YoloV5nano, YoloV8nano).

Тестирование всех алгоритмов проводилось на базе системы Ubuntu 18.04 с программным пакетом для создания роботизированных систем ROS1-melodic. В настоящее время ROS1 считается устаревшим пакетом, ему на смену пришел ROS2, в котором реализованы более удобные методы создания программ и который делает систему робота более защищенной к сбоям в работе отдельных программ. Еще одним достоинством ROS2 является наличие и постоянное пополнение готовыми программными пакетами с открытым исходным кодом.

Алгоритм RTAB-Map

Картирование местности осуществлялось с помощью связки сенсоров RGBD, LiDAR. На рис. 1 представлена трехмерная карта помещения. Стоит отметить, что алгоритм потребляет меньшее количество вычислительных ресурсов робота, нежели чем ORB-SLAM2: во время записи карты уровень загрузки CPU составлял от 80 до 90 %, при использовании ORB-SLAM2 – 100 %.

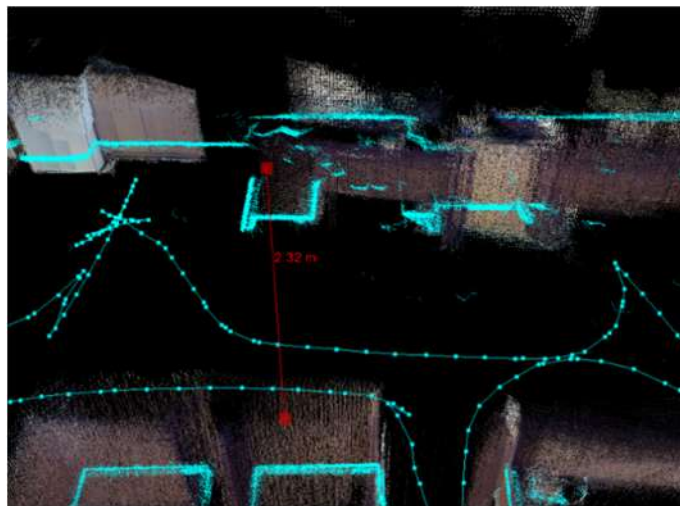


Рис. 1. Карта помещения, на которой отражена траектория движения робота в процессе картирования

Каждому узлу на траектории движения соответствует RGB-изображение и D-изображение, которые записываются в отдельную директорию пакета. На рис. 1 красным отрезком отмечено расстояние 2,32 м.

Для навигации на улице на открытой территории более целесообразно использовать не трехмерную карту местности, а двумерную. В методе RTAB-Мар двумерная карта строится на основе двух источников данных: проекции трехмерной карты на двумерную плоскость и данных с лидара. Алгоритм позволяет записать двумерную карту местности.

В пакете RTAB-Мар реализован функционал для осуществления навигации по заранее записанной карте. Для навигации необходимо совершить несколько действий: указать точку на карте, в которой находится робот и указать точку назначения. В результате робот начинает передвижение по маршруту.

Качество навигации по карте все равно невысокое, так как колеса робота проскальзывают по полу при поворотах и энкодеры колес накручивают пробег, что с точки зрения программы, означает поворот робота на определенный угол, хотя в действительности он повернулся на меньший угол. Эта проблема может быть решена подбором оптимальной скорости робота, при которой проскальзывание удастся нивелировать.

В режиме навигации робот избегает препятствий: если перегородить роботу дорогу, он в течение короткого времени (от 0,5 до 1 с) меняет траекторию движения, чтобы объехать препятствие.

В графическом интерфейсе навигации робота видно, что алгоритм четко разделяет статическую (заранее записанную) и динамическую карту местности. В настройках алгоритма можно изменять радиус «летальности» динамических препятствий и скорость затухания «летальности». «Летальность» показывает то, как сильно возрастает опасность сближения с препятствием при сокращении расстояния до него. Радиус «летальности» обозначает расстояние до препятствия, на котором у точек на карте вес летальности становится максимальным (робот избегает такие точки карты). Соответственно, вне радиуса летальности этот вес плавно уменьшается (скорость уменьшения можно настраивать).

Экспериментально были протестированы летальности с радиусом 12 и 4 см. Установлено, что одним из плюсов данного алгоритма является запись только статических объектов в карту при картировании местности. Если при записи карты мимо робота проходит человек, то алгоритмы фильтруют точки карты, которые соответствуют человеку, и они не попадают в карту местности.

Детектор Darknet и DNN OpenCV

На рис. 2 показаны графики процесса обучения моделей Yolo v3 tiny и Yolo v4 tiny для детектирования фонарей-меток, а также показано количество кадров в секунду, которое удалось получить при детектировании объектов в режиме реального времени. В дальнейшем предполагается использование предварительно обученных моделей, взятых из открытых источников.

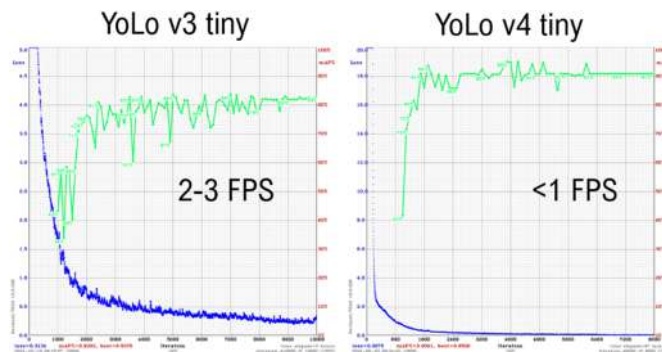


Рис. 2. Графики обучения легковесных моделей Yolo v3 tiny и Yolo v4 tiny в среде Darknet

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты детектирования фонарей-меток. Красным прямоугольником показано местоположение фонаря на картинке, зеленым – днища фонаря. Числа указывают на достоверность детектирования: чем ближе к единице, тем лучше. Синим прямоугольником отмечен светодиод. Детектируя изменения яркости в синем прямоугольнике, робот может определять частоту мерцания фонаря и, таким образом, определять свое местоположение в пространстве.



Рис. 3. Демонстрация детектирования сразу нескольких фонарей-меток

Детектор в среде PyTorch

На рис. 4 представлены результаты работы по внедрению PyTorch детекторов в робот. Прямоугольниками отмечаются объекты – выводятся их названия. Оценка достоверности детектирования «Модель» позволяет не только выводить графическую информацию о детектируемых объектах, но и передавать местоположение этих объектов в поле зрения в виде массива чисел, обозначающих границы прямоугольников, внутри которых эти объекты расположены. Эти данные можно использовать, чтобы избежать столкновений робота с объектами: чем больше размер прямоугольника, тем ближе объект находится к роботу.

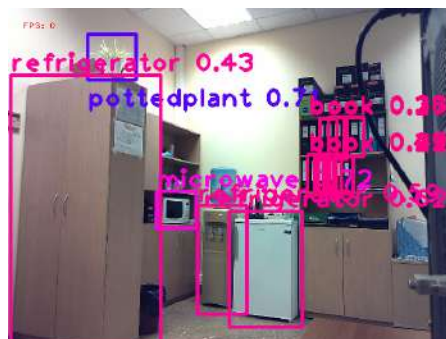


Рис. 4. Результат работы детектора Yolo v5 small PyTorch

Важной особенностью детекторов на основе среды PyTorch является практически непрерывное сопровождение детектируемых объектов на изображении, что является достоинством в контексте применения в автономных роботизированных системах.

Быстродействие окружения PyTorch не уступает быстродействию Darknet + DNN OpenCV. Поскольку у Raspberry Pi 4B довольно ограниченные возможности по осуществлению вычислений, задержка между соседними кадрами составляет порядка 2300 мс для Yolo v5 small

и 1100 мс для Yolo v5 nano. Эти модели отличаются количеством параметров. Соответственно, чем больше модель, тем лучше качество детектирования, но меньше скорость работы.

В табл. 1, 2 приведена сравнительная информация, которая показывает время обработки одного кадра (последний столбец) и информацию о модели: размер входного изображения в пикселях, качество предсказаний (стремимся к единице), количество параметров модели в миллиардах, количество операций с плавающей точкой.

Таблица 1

Сравнение различных моделей nano-сегмента

Модель	Размер изображения	mAP _{0.5:0.95} (val)	Количество параметров, 10 ⁹	Количество FLOPS, 10 ⁹	PyTorch ΔT, мс
Yolov5nu	640×640	34,3	2,6	7,7	1100
Yolov8n	640×640	37,3	3,2	8,7	1100
YoloX-nano	416×416	25,8	0,91	1,08	–

Здесь mAP – качество детектирования объекта, которое выражается в том, как хорошо прямоугольник для объекта совпадает с реальным местоположением объекта. Также в таблице отражено количество операций с плавающей точкой в секунду, которое указывает на вычислительную нагрузку на системы робота. Для модели YoloX-nano эксперименты еще не были проведены в силу возникших ошибок с ПО робота.

Таблица 2

Сравнение различных моделей small-сегмента

Модель	Размер изображения	mAP _{0.5:0.95} (val)	Количество параметров, 10 ⁹	Количество FLOPS, 10 ⁹	PyTorch ΔT, мс
Yolov5su	640×640	49,0	9,1	24,0	2300
Yolov8s	640×640	44,9	11,2	28,6	2900
YoloX-tiny	416×416	32,8	5,06	6,45	–

Видно, что при переходе от nano- к small-моделям длительность детектирования объектов на одном кадре изменяется от 1100 до 2900 мс.

Заключение

В ходе работ были проведены тесты нейросетевых алгоритмов детектирования объектов в режиме реального времени, работающих в различных средах разработки. Каждая из моделей отличается количеством параметров: чем больше модель, тем лучше качество детектирования, но меньше скорость работы. В ближайшее время при использовании более мощных вычислительных платформ появится возможность применения еще более сложных и «тяжелых» моделей в мобильных наземных роботах. Это станет важным шагом, который поможет значительно повысить качество детектирования объектов, делая системы более эффективными и точными. В данный момент ведутся работы по разработке и внедрению таких моделей, что, несомненно, откроет новые горизонты в области обработки данных и обучения машин.

Список литературы

1. Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Понtryгин Л. С. Теория оптимальных процессов. I. Принцип максимума // Изв. АН СССР. Сер. математическая. 1960. Т. 24, вып. 1. С. 3–42.
2. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М. : Наука, 2006. 333 с.
3. Юревич Е. И. Управление роботами и робототехническими системами. СПб., 2000. 171 с.

References

1. Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Pontryagin L.S. Theory of optimal processes. I. The maximum principle. *Izv. AN SSSR. Ser. Matematicheskaya* = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. The series is mathematical. 1960;24(1):3–42. (In Russ.)
2. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. *Iskusstvennyy intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya* = Artificial intelligence and intelligent control systems. Moscow: Nauka, 2006:333. (In Russ.)
3. Yurevich E.I. *Upravlenie robotami i robototekhnicheskimi sistemami* = Control of robots and robotic systems. Saint Petersburg, 2000:171. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Никита Владимирович Азарнов**

инженер,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: nvazarnov@istokmw.ru

Nikita V. Azarnov

Engineer,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Сергей Дмитриевич Кашицын

администратор проектов,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а);
преподаватель,
МИРЭА – Российский технологический
университет (филиал в г. Фрязино)
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: sedkashitsyn@istokmw.ru

Sergey D. Kashitsyn

Project administrator,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia);
lecturer,
MIREA – Russian Technological University
(Fryazino branch)
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Анатолий Павлович Барinov

архитектор программной системы,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: apbarinov@istokmw.ru

Anatoly P. Barinov

Software architect,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Артём Евгеньевич Ефимов

младший программист,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: aeefimov@istokmw.ru

Artem E. Efimov

Junior software developer,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Павел Олегович Михайлов

инженер-программист,
Научно-производственное предприятие
«Радиотехника»
(Россия, г. Москва, 5-й Донской пр., 15, стр. 11);
аспирант,
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
(Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, стр. 2)
E-mail: pm@nppt.ru

Pavel O. Mikhailov

Software engineer,
Research and Production Enterprise
"Radiotechnika"
(build. 11, 15 5th Donskoy passage, Moscow,
Russia);
postgraduate student,
Lomonosov Moscow State University
(build. 2, 1 Leninskie Gory street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.04.2025

Принята к публикации / Accepted 12.05.2025

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317; 629.7

doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-9

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

А. С. Ишков¹, П. А. Максимов², А. В. Селиверстов³

^{1,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

¹ishkovanton@mail.ru, ²m@pa8880.ru, ³tollik.seliverstov.03@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В рамках развития космической отрасли важным аспектом является уменьшение стоимости и сроков, а также повышение качества проведения измерений параметров электронной аппаратуры, в том числе изделий, сочетающих в себе как аналоговые, так и цифровые узлы, к которым относятся адаптивные каналы управления. Для воспроизведения свойств излучения космического пространства используются моделирующие и имитирующие установки, что сопряжено со сложностью инфраструктуры измерительных стендов, высокой стоимостью и длительностью проведения измерений, трудностями при неудовлетворительных результатах испытаний. Цель представленного исследования – разработка специализированного стенда для измерения параметров адаптивных каналов управления на основе цифровой модели исследуемого образца, воспроизводящего эффекты электронной компонентной базы, связанные с воздействием космического излучения программно-аппаратными методами для оценки устойчивости адаптивных систем управления в контролируемых условиях. *Материалы и методы.* В основу работы положена интеграция аппаратных и программных компонентов. Аппаратная часть включает систему внесения и отслеживания изменений в параметры действующих в исследуемом образце аналоговых и цифровых сигналов посредством высокоточных аналого-цифровых преобразователей и микроконтроллеров, обеспечивающих синхронный контроль параметров. В качестве источника температурных воздействий, близких к условиям космического пространства, используется термокамера. Программная часть реализована на ПЭВМ как модуль управления стендом, в состав которого включены: управляемый источник измеряемой физической величины; система внесения и отслеживания изменений в параметры действующих в исследуемом образце аналоговых и цифровых сигналов; дополнительное измерительное оборудование, имеющее возможность быть включенным в состав измерительного стенда по желанию испытателя. *Результаты.* Сформирована теоретическая основа стенда, а именно: назначение, технические возможности, структура аппаратно-программного комплекса и детальное описание его компонентов. *Вывод.* Разработанный стенд обеспечивает безопасное, гибкое и комплексное измерение параметров электронных изделий, используемых в настоящее время для повышения надежности, качества, уменьшения стоимости и длительности на проведение измерений. Его внедрение ускоряет разработку надежных систем для космических аппаратов.

Ключевые слова: адаптивные каналы управления, измерения параметров, космическое излучение, космический аппарат, термокамера, электронная компонентная база, аналого-цифровой преобразователь, цифроаналоговый преобразователь, персональная электронно-вычислительная машина

Для цитирования: Ишков А. С., Максимов П. А., Селиверстов А. В. Специализированный стенд проведения измерений параметров адаптивных каналов управления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 73–79. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-9

SPECIALISED STAND FOR MEASURING PARAMETERS OF ADAPTIVE CONTROL CHANNELS

A.S. Ishkov¹, P.A. Maksimov², A.V. Seliverstov³

^{1,3} Penza State University, Penza, Russia

² Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

¹ ishkovanton@mail.ru, ² m@pa8880.ru, ³ tollik.seliverstov.03@mail.ru

Abstract. *Background.* In the development of the space industry, an important aspect is to reduce the cost and time, as well as improve the quality of measurements of the parameters of electronic equipment. Including products that combine both analog and digital units, which include adaptive control channels. To reproduce the properties of radiation of outer space, modeling and simulating installations are used, which is associated with the complexity of the infrastructure of measuring stands, high cost and duration of measurements, difficulties with unsatisfactory test results. The purpose of the presented study is to develop a specialized stand for measuring the parameters of adaptive control channels based on a digital model of the sample under study, reproducing the effects of ECB associated with the impact of cosmic rays using software and hardware methods to assess the stability of adaptive control systems under controlled conditions. *Materials and methods.* The work is based on the integration of hardware and software components. The hardware part includes a system for introducing and tracking changes in the parameters of analog and digital signals operating in the test sample by means of high-precision ADCs and microcontrollers providing synchronous control of the parameters. A thermal chamber is used as a source of temperature effects close to the conditions of outer space. The software part is implemented on a PC as a module for controlling the stand, which includes: a controlled source of the measured physical quantity; a system for introducing and tracking changes in the parameters of analog and digital signals operating in the test sample; additional measuring equipment that can be included in the measuring stand at the request of the tester. *Results.* The theoretical basis of the stand has been formed, namely: the purpose, technical capabilities, structure of the hardware and software complex and a detailed description of its components. *Conclusion.* The developed stand ensures safe, flexible and comprehensive measurement of the parameters of electronic products, the methods currently used to improve reliability, quality, reduce the cost and duration of measurements. Its implementation accelerates the development of reliable systems for space vehicles.

Keywords: adaptive control channels, parameter measurements, space radiation, space vehicle, thermal chamber, electronic component base, analog-to-digital converter, digital-to-analog converter, personal electronic computer

For citation: Ishkov A.S., Maksimov P.A., Seliverstov A.V. Specialised stand for measuring parameters of adaptive control channels. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3): 73–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-9

Введение

Развитие космических технологий сопровождается ростом требований к надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В этой связи адаптивные каналы управления, осуществляющие контроль различных параметров систем космического аппарата (КА), требуют комплекса измерительных процедур, подтверждающих целевые характеристики и их сохранность при воздействии излучений космического пространства. Однако традиционные методы тестирования сталкиваются с проблемами высокой стоимости и длительности процессов, что замедляет разработку и определяет высокую стоимость ошибки при проектировании, которая, как правило, может быть выявлена только на самых последних этапах разработки. Особую сложность представляет тестирование гибридных аналого-цифровых схем, где взаимодействие компонентов требует синхронного контроля множества параметров.

Таким образом, актуальность создания специализированного стенда, позволяющего проводить измерения на территории завода-изготовителя РЭА до проведения испытаний с использованием моделирующих и имитирующих установок [1], обусловлена необходимостью ускорения разработки электронной компонентной базы (ЭКБ) для космических аппаратов [2].

Методы испытаний ЭКБ

Современные методы испытаний электронной компонентной базы для космических применений возможны при проведении натурного эксперимента с использованием моделирующих и имитирующих установок. Первый подход мало реализуем на практике ввиду его значительной сложности. Второй подход, обеспечивая наибольшую достоверность, требует сложной

инфраструктуры и значительных временных затрат [3]. Третий подход использует альтернативные источники излучения. Так, например, лазерные имитаторы не способны воспроизвести комплексное воздействие космического излучения [4], но при сверке с результатами испытаний на моделирующих установках в ряде случаев могут обеспечивать адекватные условия испытаний ЭКБ и РЭА.

Другим подходом являются расчетно-экспериментальные методы, в которых проводится моделирование эффектов космического излучения, что дает адекватные результаты для отдельных элементов и структур, но часто игнорирует физические процессы и комплексность влияния космического излучения на сложные электронные узлы [5].

Преимущества создания специализированных стендов, разработанных для внесения эффектов воздействия космического излучения в исследуемый образец в процессе проведения измерений, частично решают указанные проблемы за счет интеграции нескольких ключевых технологий.

Аппаратная часть стенда включает программируемые источники помех, которые искажают сигналы в аналоговых и цифровых цепях, имитируя эффекты влияния космического излучения. Так, инъекция шума посредством операционных усилителей позволяет воспроизвести влияние, вызываемое одиночными событиями (*Single Event Effects, SEE*) [6, 7]. В то же время термокамера используется для обеспечения температурного режима аналогичного диапазону, в котором функционирует КА, обеспечивая комплексное воздействие двух видов воздействия, что критически важно для оценки долговременной устойчивости компонентов.

Программная часть стенда реализует алгоритмы, вычисляющие степень изменения параметров узлов и субблоков элементов микросхем в составе канала управления для последующей передачи их в аппаратную часть, а также отслеживание текущих параметров функционирования измерительного стенда. Синхронный контроль аналоговых параметров и цифровых характеристик позволяет обеспечить комплексный анализ взаимодействия компонентов.

Структура аппаратно-программного комплекса

В ходе проведенных исследований авторами предложена структурная схема аппаратно-программного комплекса (АПК) как основы специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления, представленная на рис. 1.

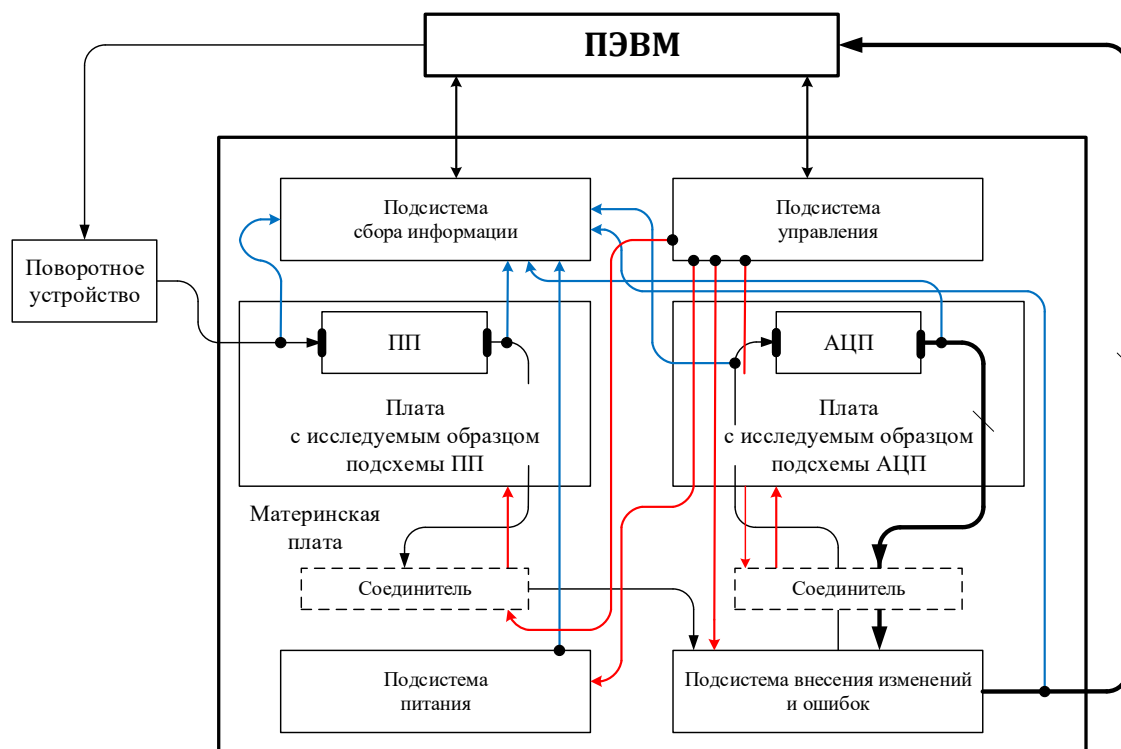


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Структура и состав АПК подразумевают его возможность быть установленным в типовые средства проведения испытаний (термокамера) с выводом отдельных информационных каналов

за пределы установки для связи с персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) для обмена данными. Разработанный комплекс представляет из себя четыре подсистемы, расположенные на одной плате, в которую посредством соединителей устанавливаются элементы измерительного канала – датчик и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с их дискретными элементами. Связь между элементами осуществляется по плате, с измерительным оборудованием – внешними кабелями.

Разделение на подсистемы АПК подразумевает наличие четырех независимых частей в составе материнской платы, каждая из которых имеет возможность быть модифицированной:

– подсистема сбора информации осуществляет сбор и преобразование в цифровой вид напряжений сигналов, циркулирующих в измеряемой схеме, напряжений питания исследуемой схемы, а также прием данных, необходимых для внесения корректировок и поправок, связанных с влиянием космического излучения. Обмен данными с программой на ПЭВМ [8];

– подсистема управления осуществляет контроль других подсистем аппаратно-программного комплекса, сбор собственной телеметрии. Получая текущие данные от программы на ПЭВМ, где функционирует математическая модель исследуемого образца, производит управление подсистемой внесения изменений и ошибок исследуемой схемы, подсистемой сбора информации, подсистемой питания АПК;

– подсистема питания и подсистема внесения изменений и ошибок осуществляют управление питанием исследуемой схемы измерительного канала и процессом внесения ошибок в исследуемый измерительный сигнал, а также выходной цифровой код АЦП соответственно.

На основе разработанной структурной схемы АПК предложена его функциональная схема (рис. 2), которая разъясняет процессы преобразования информации отдельными его блоками и демонстрирует принцип работы АПК в целом.

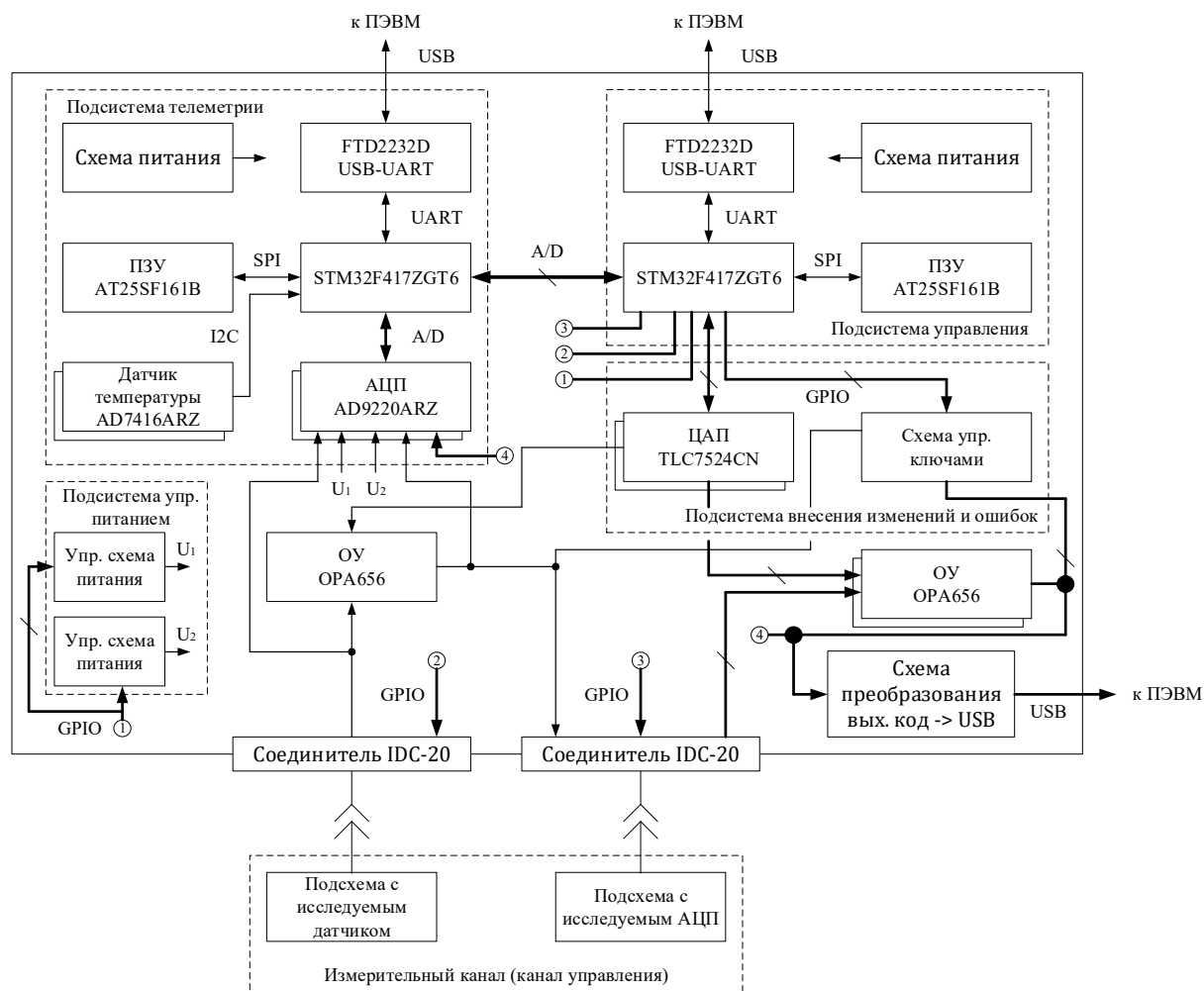


Рис. 2. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса

С учетом типа исследуемого адаптивного канала управления реализация аппаратно-программного комплекса представляет собой схему из двух микроконтроллеров, работающих

на частоте до 160 МГц, каждый из которых связан через интерфейс USB с ПЭВМ для независимой работы и обмена данными на скорости до 12 Мбит/с. Подсистемы АПК имеют независимое питание для нивелирования влияния помех от каждой из систем на параметры исследуемой схемы.

Сбор информации о текущем значении амплитуды сигнала осуществляется с помощью нескольких АЦП, входы которых подключаются к соответствующим исследуемым линиям. Внесение изменений, связанных с постепенной деградацией характеристик элементов измерительного канала и их частей, реализовано за счет использования схем сложения/вычитания на операционных усилителях и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Изменения, связанные с влиянием ионов и протонов космического излучения, реализованы за счет аналоговых ключей.

Описание специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления

Специализированный стенд предназначен для одновременного воспроизведения влияния космического излучения и физического влияния заданного вида воздействия на электронные компоненты в условиях, приближенных к эксплуатационным, без использования моделирующих и имитирующих установок. Его архитектура обеспечивает комплексный контроль параметров адаптивных систем управления, таких как точность, устойчивость к помехам и температурным нагрузкам [9].

Разработанная структурная схема специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления представлена на рис. 3.

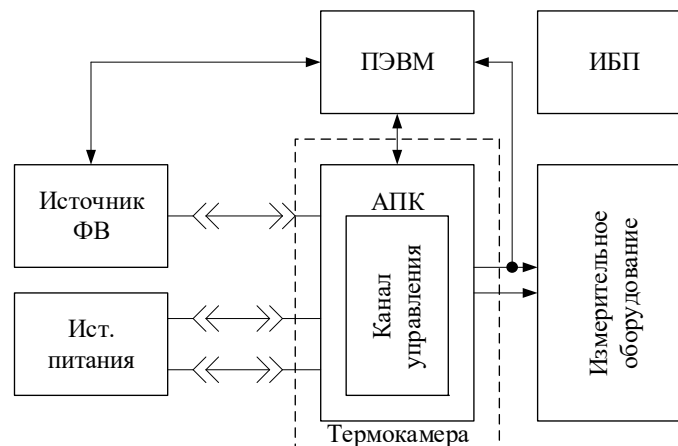


Рис. 3. Структурная схема специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления

В состав специализированного стенда входят следующие компоненты:

- 1) ПЭВМ – выполняет роль центра управления, запускает программные модели, имитирующие эффекты, вызванные космическим излучением; обрабатывает данные с измерительных модулей, управляет работой АПК [10];
- 2) источник физической величины – имитирует изменение измеряемой адаптивным каналом управления физической величины в соответствии с ранее заданной функцией;
- 3) источник питания – обеспечивает питание АПК и исследуемого образца;
- 4) источник бесперебойного питания – гарантирует бесперебойную работу стенда при колебаниях напряжения в сети (220 В), защищая критически важные компоненты;
- 5) канал управления – исследуемый объект, осуществляющий преобразование заданной аналоговой физической величины в цифровой код, поступающий в последующие системы КА;
- 6) термокамера – воспроизводит температурные режимы от -60°C до $+120^{\circ}\text{C}$, позволяя оценить влияние экстремальных условий на деградацию компонентов;
- 7) измерительное оборудование – позволяет произвести замеры степени деградации измерительного канала и включает в себя: осциллографы для анализа сигналов в реальном времени и логические анализаторы для отслеживания цифровых сбоях.

Заключение

Специализированный стенд измерения параметров адаптивных каналов управления представляет собой эффективное решение для испытаний ЭКБ и РЭА КА в условиях, приближенных к эксплуатационным. Его архитектура, сочетающая программно-управляемое аппаратное воспроизведение эффектов, связанных с воздействием космического излучения, подаваемого в процессе климатического воздействия при проведении измерений, ускоряет разработку надежных систем, снижает затраты и риски, связанные с ошибками в разрабатываемой РЭА, способными привести к неудовлетворительным результатам испытаний.

Список литературы

1. Иванов А. О., Кохановский А. Г., Кремез Г. В., Лачугин В. П. Экспериментальные исследования радиационной стойкости элементной базы бортовой аппаратуры космических аппаратов // Труды военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2013. № 641. С. 12–18. EDN: RYHUGP
2. Никифоров А. Ю., Телец В. А. Радиационная стойкость электронной компонентной базы систем специальной техники и связи // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 2–4. EDN: OOSZAN
3. Никифоров А. Ю., Скоробогатов П. К., Стриханов М. Н. [и др.]. Развитие базовой технологии прогнозирования, оценки и контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 5. С. 18–23. EDN: PEMQXJ
4. Яненко А. В., Чумаков А. И., Печенкин А. А. [и др.]. Сравнительный анализ испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 4–7. EDN: OOSZAX
5. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
6. Чуков Г. В., Елесин В. В., Бойченко Д. В. [и др.]. Эффекты одиночных событий в РЧ и СВЧ ИС // Микроволновые и телекоммуникационные технологии : 24-я Междунар. Крымская конф. Севастополь, 2014. С. 860–861. doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959665 EDN: UFMQQP
7. Громов В. Т. Введение в радиационную физику твердого тела. Снежинск : Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. 208 с.
8. Елесин В. В., Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чуков Г. В. Комплекс методических, аппаратных и программных средств для автоматизированных исследований параметров полупроводниковых СВЧ ИС в условиях испытаний на радиационную стойкость // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 28–32.
9. Зебрев Г. И. Моделирование дозовых и одиночных радиационных эффектов в кремниевых микро- и нанoeлектронных структурах для целей проектирования и прогнозирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2009. 156 с.
10. Ожегин Ю. А., Никифоров А. Ю., Телец В. А. [и др.]. Направления развития системы управления качеством радиационных испытаний электронной компонентной базы // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 59–62. EDN: OOSZFX

References

1. Ivanov A.O., Kokhanovskiy A.G., Kremez G.V., Lachugin V.P. Experimental studies of the radiation resistance of the element base of the onboard equipment of spacecraft. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky*. 2013;(641):12–18. (In Russ.)
2. Nikiforov A.Yu., Telets V.A. Radiation resistance of the electronic component base of special equipment and communications systems. *Spetstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):2–4. (In Russ.)
3. Nikiforov A.Yu., Skorobogatov P.K., Strikhanov M.N. et al. Development of basic technology for forecasting, evaluation and control of radiation resistance of microelectronics products. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = News of higher educational institutions. Electronics*. 2012;(5):18–23. (In Russ.)
4. Yanenko A.V., Chumakov A.I., Pechenkin A.A. et al. Comparative analysis of tests of the electronic component base for resistance to the effects of individual nuclear particles on laser simulators and ion accelerators. *Spetstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):4–7. (In Russ.)
5. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya = Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012:304. (In Russ.)
6. Chukov G.V., Elesin V.V., Boychenko D.V. et al. Effects of single events in RF and microwave IC. *Mikrovolnovye i telekommunikatsionnye tekhnologii: 24-ya Mezhdunar. Krymskaya konf. Sevastopol' = Microwave and Telecommunication technologies : 24th International Crimean conference*. 2014:860–861. (In Russ.). doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959665

7. Gromov V.T. *Vvedenie v radiatsionnyuyu fiziku tverdogo tela = Introduction to solid state radiation physics*. Snezhinsk: Izd-vo RFYaTs-VNIITF, 2007:208. (In Russ.)
8. Elesin V.V., Nikiforov A.Yu., Telets V.A., Chukov G.V. A set of methodological, hardware and software tools for automated studies of semiconductor microwave IC parameters under radiation resistance testing conditions. *Spetsstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):28–32. (In Russ.)
9. Zebrev G.I. Modeling of dose and single dose radiation effects in silicon micro- and nanoelectronic structures for design and forecasting purposes: DSc abstract. Moscow, 2009:156. (In Russ.)
10. Ozhegin Yu.A., Nikiforov A.Yu., Telets V.A. et al. Directions for the development of a quality management system for radiation testing of an electronic component base. *Spetsstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):59–62. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Сергеевич Ишков

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ishkovanton@mail.ru

Anton S. Ishkov

Candidate of technical sciences, associate professor of the sub-department of radio engineering and radio electronic system, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Павел Андреевич Максимов

инженер-программист, Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт (Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: m@pa8880.ru

Pavel A. Maksimov

Software engineer, Penza Research Electrotechnical Institute (9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Анатолий Владимирович Селиверстов

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tolik.seliverstov.03@mail.ru

Anatoly V. Seliverstov

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 13.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.04.2025

Принята к публикации / Accepted 12.05.2025

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ МІМ-ТЕХНОЛОГИИ

**А. С. Никиткин¹, А. Д. Семенов², А. М. Пастухов³,
И. А. Рубцов⁴, А. П. Цветков⁵, Е. А. Печерская⁶**

¹ ФНПЦ «ПО "Старт"» имени М. В. Проценко, Заречный, Пензенская обл., Россия

^{2, 3, 4, 5, 6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ paul-startatom@yandex.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ^{3, 5} iit@pnzgu.ru, ⁴ rui2000@yandex.ru, ⁶ peal@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются методы контроля технологического процесса производства изделий с использованием МІМ-технологии (Metal Injection Molding), которая является перспективным направлением для достижения технологического суверенитета и модернизации производства. Цель работы – повышение параметров качества изделий, изготовленных методом МІМ-технологии посредством анализа ключевых этапов МІМ-процесса и контроля технологических режимов, обуславливающих дефекты изделий на каждом этапе. *Материалы и методы.* Представлены результаты исследования металлических порошков (нержавеющая сталь, титан, медь и др.), связующих компонентов (воск/полимер и полимер/полимер) на основе современных методов анализа: электронная микроскопия, лазерная дифракция, газовая пикнометрия, радиографический контроль, капиллярная и моментная реометрия. Проанализированы с точки зрения управления качеством этапы производства: приготовление гранулята, литье под давлением, удаление связующего (термический, растворный, каталитический методы) и спекание. *Результаты.* Установлено, что качество гранулята и равномерность распределения компонентов критически влияют на отсутствие дефектов в спеченных изделиях. Определены оптимальные параметры литья (температура, давление, скорость впрыска) и спекания (температурные профили, атмосфера печи). Показано, что современные методы контроля (например, масс-спектрометрия, лазерное сканирование) позволяют минимизировать дефекты и улучшить механические свойства изделий. *Выводы.* Применение комплексного контроля на всех этапах МІМ-технологии обеспечивает высокое качество продукции, снижение брака и соответствие требованиям для ответственных применений (аэрокосмическая отрасль, медицина). Особое внимание уделено необходимости стандартизации процессов и использованию автоматизированных систем мониторинга для повышения эффективности производства.

Ключевые слова: МІМ-технология, металлические порошки, спекание, контроль качества, дефекты, гранулят

Для цитирования: Никиткин А. С., Семенов А. Д., Пастухов А. М., Рубцов И. А., Цветков А. П., Печерская Е. А. Контроль параметров в процессе изготовления изделий методом МІМ-технологии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 80–88. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-10

PARAMETER CONTROL IN THE PROCESS OF MANUFACTURING PRODUCTS USING MIM TECHNOLOGY

**A.S. Nikitkin¹, A.D. Semenov², A.M. Pastukhov³,
I.A. Rubtsov⁴, A.P. Tsvetkov⁵, E.A. Pecherskaya⁶**

¹ FNPC Start named after M.V. Protsenko, Zarechny, Penza region, Russia

^{2, 3, 4, 5, 6} Penza State University, Penza, Russia

¹ paul-startatom@yandex.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ^{3, 5} iit@pnzgu.ru, ⁴ rui2000@yandex.ru, ⁶ peal@list.ru

Abstract. *Background.* The article is devoted to methods of controlling the technological process of manufacturing products using MIM technology (Metal Injection Molding), which is a promising direction for achieving technological sovereignty and modernization of production. The aim of the work is to improve the quality parameters of products manufactured using MIM technology by analyzing the key stages of the MIM process and monitoring the technological modes that cause defects in products at each stage. *Materials and methods.* The study used metal powders (stainless steel, titanium, copper, etc.), binding components (wax/polymer and polymer/polymer), as well as modern methods of analysis: electron microscopy, laser diffraction, gas pycnometry, radiographic control, capillary and moment rheometry. The stages of production are analyzed from the point of view of quality management: preparation of granulate, injection molding, removal of binder (thermal, solution, catalytic methods) and sintering. *Results.* It was found that the quality of the

granulate and the uniformity of the distribution of components critically affect the absence of defects in sintered products. The optimal parameters of casting (temperature, pressure, injection rate) and sintering (temperature profiles, furnace atmosphere) are determined. It is shown that modern control methods (for example, mass spectrometry, laser scanning) can minimize defects and improve the mechanical properties of products. *Conclusions.* The use of integrated control at all stages of MIM technology ensures high product quality, reduced defects, and compliance with requirements for critical applications (aerospace, medicine). Special attention is paid to the need for standardization of processes and the use of automated monitoring systems to improve production efficiency. Keywords: MIM technology, metal powders, sintering, quality control, defects, granulate.

Keywords: MIM technology, metal powders, sintering, quality control, defects, granulate

For citation: Nikitkin A.S., Semenov A.D., Pastukhov A.M., Rubtsov I.A., Tsvetkov A.P., Pecherskaya E.A. Parameter control in the process of manufacturing products using MIM technology. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):80–88. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-10

Введение

МИМ-технология (Metal Injecting Molding) представляет собой литье под давлением термопластичных полимерных материалов, высоконаполненных металлическим порошком. В мире около 70 % металлических деталей весом до 150 г изготавливается методом МИМ-технологии [1, с. 13], а объем их продаж в 2020 г. составил более 2,5 млрд долл. [2, с. 57]. МИМ-технология имеет ряд преимуществ, а именно: высокую производительность, высокий коэффициент использования материала, а также высокую точность воспроизведения геометрии изделия.

Технология изготовления изделий методом МИМ-технологии является сложным и наукоемким технологическим процессом, схема изготовления изделий методом МИМ-технологии приведена на рис. 1 [3]. Основные этапы технологического процесса включают: приготовление фидстока (гранулята) сырья для МИМ-технологии, формование деталей методами литья под давлением на термопластавтоматах (ТПА), удаление связующего компонента и спекание.

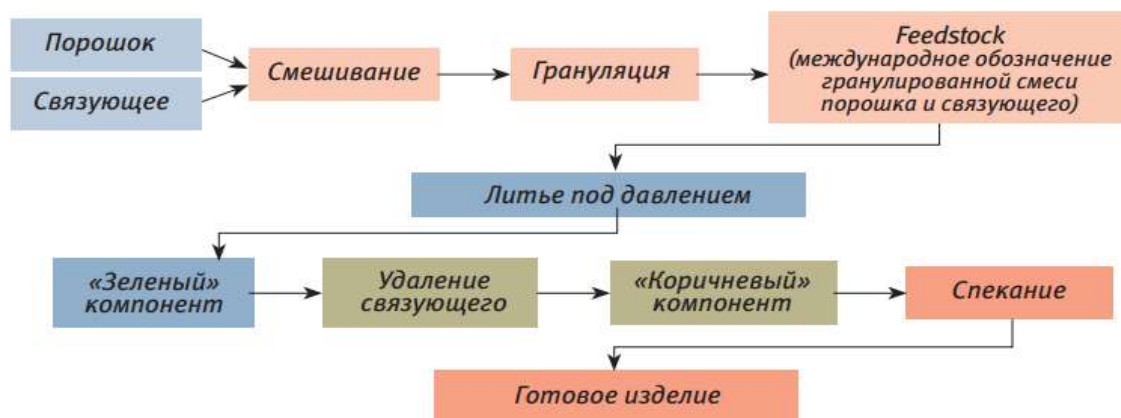


Рис. 1. Схема изготовления изделий по МИМ-технологии [3]

Материалы и методы

Многие металлы обрабатываются методом литья под давлением. Типичными материалами являются нержавеющая сталь, железо, железо-никелевые сплавы, жаропрочные сплавы (например, инконель), титан, титановые сплавы и медь [4]. Наиболее важными характеристиками металлического порошка являются размер частиц, их гранулометрический состав и форма [4]. Эти параметры, особенно форма частиц, зависят от способа получения порошка. На данный момент известны следующие основные методы производства измельченных порошков: газового распыления, водного распыления, электрохимического и плазменного распыления [5, 6]. Связь между процессом получения порошка и формой частиц очень четко определена, например, при распылении газа получаются круглые частицы, в то время как при распылении воды получаются частицы неправильной формы, с другой стороны, электрохимические методы дают губчатые частицы неправильного контура. Особая форма обусловлена динамическими особенностями формирования порошка из расплавленного или растворенного металла или сплава.

Предпочтительной формой порошка в МИМ является сферическая, которая позволяет получить более плотную упаковку, чем при использовании частиц неправильной формы.

Форма частиц исследуется с помощью электронной микроскопии (рис. 2).

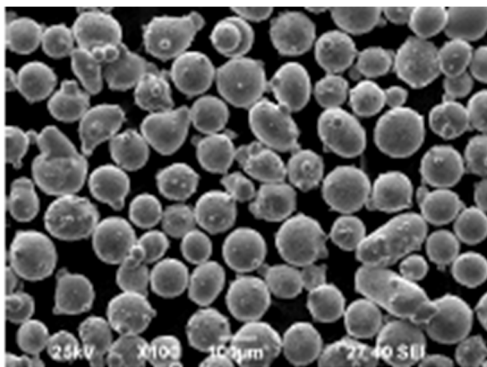


Рис. 2. Изображения порошка титана, полученные с помощью электронного микроскопа, увеличение 1000×

Кроме того, предпочтение отдается порошкам с широким распределением по размерам из-за более плотной упаковки по сравнению с порошками одного размера зерна. Гранулометрический состав исследуется с помощью метода лазерной дифракции: на основе анализа дифракционной картины интенсивности рассеивания лазерного излучения на взвеси частиц исследуемого порошка строится гистограмма распределения частиц по размерам (рис. 3).

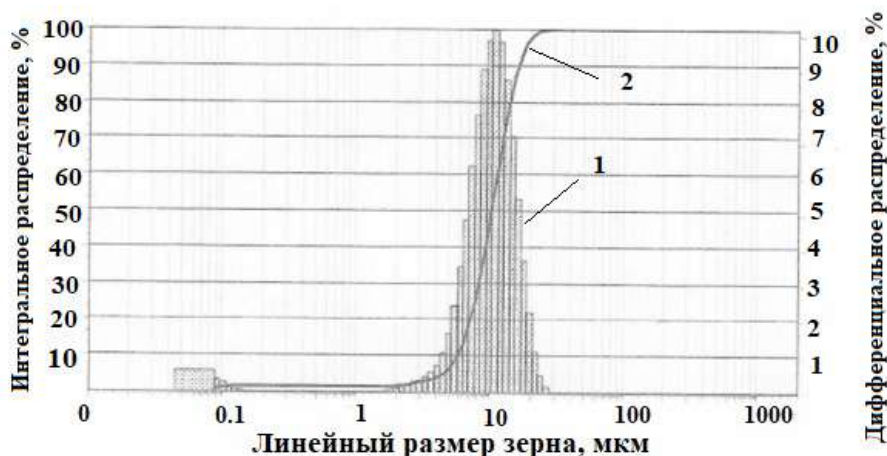


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц порошка стали 12X18H10Т:

1 – дифференциальная функция распределения частиц по размерам (плотность распределения); 2 – интегральная функция распределения

Связующие для МИМ можно разделить в зависимости от основных компонентов на две группы: связующие на основе воска, модифицированные полимерами (или воск/полимер), и связующие на основе полимера (или полимер/полимер). Связующие на основе воска, модифицированные полимерами, состоят из одного или нескольких восков различного происхождения и одного или нескольких полимеров. Второй набор связующих на полимерной основе состоит из смесей двух или более полимеров. Роль связующего заключается в придании текучести исходному материалу и возможности осуществления процесса литья под давлением на ТПА. Поэтому связующее следует рассматривать как средство для придания формы так называемой «зеленой» детали¹. Окончательные свойства материал получает после спекания – процесса, в котором связующее вещество не играет никакой роли.

Для изготовления сырья для МИМ-технологии необходимо провести смешивание связующего компонента с металлическим порошком. Смешанное сырье представляет собой гранулят

¹ ГОСТ Р 59650-2021. Литье под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими или керамическими порошками (ПИМ-технология). Термины и определения.

(рис. 4). Качество гранулята является важнейшим параметром в процессе МІМ, поскольку неоднородность исходного сырья не может быть скорректирована на следующих этапах процесса МІМ и приводит к ряду дефектов в спеченных изделиях [7, 8].

Гранулят для МІМ-технологии возможно изготавливать на различных установках, начиная от ручных миксеров с лопастями типа морского гребного винта и заканчивая двухшнековыми экструдерами. При изготовлении гранулята основными факторами, определяющими однородность исходного сырья, являются: скорость загрузки порошка или масса смешиваемого материала (в зависимости от используемого оборудования для смешивания), частота вращения лопасти ротора, тип лопасти ротора, температура перемешивания и размер частиц [9–11].



Рис. 4. Гранулят на основе порошка стали 38ХМ

Для оценки параметров смеси используются как моментная, так и капиллярная реометрия. Капиллярная реометрия широко используется для определения однородности, стабильности и основных свойств гранулята. С другой стороны, реометрия крутящего момента полезна для определения максимальной и оптимальной загрузки твердых частиц, однородности полученного сырья в результате процесса смешивания и количества энергии, требуемой для смешивания. Разница между двумя методами заключается в том, что реометры крутящего момента регистрируют крутящий момент во время перемешивания, в то время как капиллярные реометры работают с предварительно смешанным сырьем. Определение коэффициента усадки «зеленой» детали [7], после этапа спекания, контролируется соотношением металлического порошка и связующего в грануляте, контроль осуществляется с использованием метода замещения в газовой пикнометрии.

Литье под давлением

Литье под давлением в МІМ-технологии представляет собой технологический процесс формирования термопластичных полимерных материалов высоконаполненных металлическим порошком посредством литья на термопластавтоматах. Процесс начинается с дозированной подачи гранулированного материала в материальный цилиндр, где происходит нагрев и получение расплава в виде пластиката. Далее осуществляется инжекционный впрыск расплава в пресс-форму под рабочим давлением 500–2000 бар с последующей выдержкой для компенсации усадки материала. После охлаждения отливки до температуры застывания производится извлечение готового изделия механизмом выталкивания [14].

Ключевыми технологическими параметрами процесса являются температура расплава, давление впрыска (500–2000 бар), скорость впрыска (50–300 мм/с), время выдержки под давлением (2–30 с) и температура формы (50–140 °С). Процесс осуществляется на термопластавтоматах с усилием смыкания 25–10 000 т с использованием пресс-форм из инструментальных сталей, обеспечивающих точность обработки поверхности до 0,01 мм.

При литье металлических порошков под давлением ключевыми технологическими дефектами являются сегрегация порошка и расслоение связующего компонента. Данные дефекты формируются на стадии литья вследствие неоднородного распределения компонентов смеси под действием высоких давлений.

Расслоение связующего проявляется в виде образования концентрированного полимерного слоя в приповерхностной области литниковой системы. Это явление обусловлено реологическим

поведением многокомпонентной системы, где низковязкий связующий компонент мигрирует к стенкам формы, создавая смазочный эффект. Последующее высокоскоростное течение высоконаполненной порошковой массы приводит к ударному взаимодействию с поверхностью формы с последующим отражением потока, что вызывает образование дефектов структуры в виде газовых включений и линий спая. Сегрегация порошка возникает как следствие дифференциального движения фаз в процессе течения расплава, когда твердые частицы и полимерная матрица демонстрируют различное поведение при высоких скоростях сдвига. Данный эффект усугубляется при наличии резких перепадов давления в литниковой системе. Указанные дефекты (сегрегация порошка и расслоение связующего) критически влияют на качество спеченных изделий, приводя к неоднородности плотности, снижению механических свойств и образованию дефектов структуры. Это подтверждает важность контроля «зеленых» заготовок на ранних этапах.

Для обеспечения высокого качества «зеленых» деталей применяются следующие методы контроля: визуальный и оптический контроль, метод газовой пикнометрии, метод радиографического контроля.

Визуальный и оптический контроль позволяют осуществлять проверку поверхности на наличие трещин, сколов, неравномерного заполнения формы. Перспективным представляется использование микроскопов и систем машинного зрения для автоматического обнаружения дефектов, измерение плотности заготовки до и после литья для выявления отклонений, связанных с неполным заполнением формы или избыточным содержанием связующего¹.

Радиографический метод контроля позволяет выявить внутренние дефектные участки с пониженной плотностью, воздушные включения и зоны недолива. Такая информация помогает оперативно корректировать технологические параметры процесса. Анализ рентгеновских снимков позволяет прогнозировать возможные дефекты, которые могут проявиться на последующих этапах обработки. Например, участки с неравномерной плотностью часто становятся причиной коробления при спекании.

Современные системы обработки изображений значительно расширяют возможности анализа. Программное обеспечение автоматически выделяет проблемные зоны, измеряет их геометрические параметры и оценивает потенциальное влияние на качество готового изделия. Это особенно важно при работе со сложными формами и миниатюрными деталями.

Удаление связующего

Этап удаления, или дебинг, выполняется для очистки «зеленой» детали от термопластичного полимера, для подготовки заготовки перед спеканием². На данный момент используются многокомпонентные системы связующих: первичный компонент составляет от 60 до 90 % от общей массы связующего, вторичный от 7 до 35 %, остальное представляют собой масла и ПАВ (поверхностно-активные вещества), для улучшения реологических свойств и адгезии связующего с металлическим порошком. Превышение предельного содержания неудаленного связующего компонента приводит к уменьшению плотности спеченного изделия, снижению физико-механических характеристик и риску появления дефектов в спеченном изделии [12]. Существует несколько методов удаления связующего компонента: термический, растворный и каталитический. Термический метод заключается в деструкции полимеров при пониженном давлении и повышенной температуре (порядка 400–600 °C). Ввиду того, что данный процесс крайне неэффективен и занимает длительное время, он применяется только для удаления вторичного компонента связующего непосредственно перед спеканием. Удаление связующего растворным методом осуществляется путем экстракции первичного связующего. В зависимости от связующего подбираются различные растворители, не оказывающие влияния на основной материал (металлический порошок). Каталитический метод осуществляется путем реакции паров концентрированной азотной кислоты с первичным связующим, где в результате реакции полимер переходит в газообразное состояние и выдувается из камеры печи. Данный метод используется для удаления связующего на основе полиформальдегида. В этом случае при прямом воздействии продуктов разложения паров азотной кислоты с чистотой более, чем 98,5 %,

¹ ГОСТ Р ЕН 13018-2014 Национальный стандарт российской федерации контроль визуальный

² ГОСТ Р 59650-2021. Литье под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими или керамическими порошками (PIM-технология). Термины и определения.

полиформальдегид превращается в газообразный формальдегид, который удаляется из зеленой заготовки потоком защитного газа. Процесс происходит при температуре от 110 и до 120 °С. Данный метод отличается высокой скоростью удаления связующего, а также высокой остаточной пористостью полученной заготовки (так называемой, «коричневой детали»)¹. После удаления связующего замеряется потеря массы путем сравнения массы до удаления связующего и после. В процессе очищения заготовки первичное связующее должно быть полностью удалено.

Спекание

Процесс спекания в ММ-технологии представляет собой сложную многостадийную операцию, требующую точного контроля множества параметров. В ходе спекания формируются окончательные физико-механические свойства изделий [15]. На начальном этапе после завершения процесса дебиндинга, когда основная часть связующего вещества уже удалена, заготовка поступает в печь для спекания. Важно понимать, что даже незначительные остатки связующего могут существенно повлиять на качество конечного продукта, поэтому температурный режим на первых стадиях нагрева должен быть особенно тщательно выверен. Рекомендуется начинать нагрев с очень плавного повышения температуры – не более 2 °С в минуту. Подобная скорость нагрева позволяет полностью удалить остаточные полимеры без риска образования дефектов [16].

При достижении температурного диапазона от 300 до 600 °С происходит термическое разложение вторичного связующего компонента. Этот процесс сопровождается активным газо-выделением, что требует особого внимания к системе вентиляции печи. В современных промышленных установках для контроля данного этапа используют масс-спектрометрические анализаторы, позволяющие в реальном времени отслеживать состав выделяющихся газов. Одновременно с этим ведется постоянный мониторинг геометрических параметров изделия с помощью прецизионных лазерных сканеров, фиксирующих малейшие изменения размеров.

Переход к фазе предварительного спекания знаменуется началом активных диффузионных процессов. На этой стадии между частицами металлического порошка формируются первые прочные соединения, так называемые «шейки спекания». Микроструктура материала начинает претерпевать существенные изменения: уменьшается общая пористость, увеличивается плотность контактов между частицами. Слишком интенсивный подъем температуры ведет к образованию деформаций и короблений поверхности спекаемых образцов, поэтому крайне важно контролировать скорость нагрева.

Основная стадия спекания происходит при температуре порядка 0,7 от температуры плавления и является наиболее ответственной. На данной стадии происходит окончательное формирование микроструктуры материала. Атомы металла получают достаточную энергию для активной диффузии, что приводит к заполнению остаточных пор и достижению практически теоретической плотности материала. В этот момент важное значение имеет атмосфера в печи: спекание можно осуществлять в среде высокоочищенных инертных газов, водорода или в среде вакуума [17].

Процесс охлаждения после спекания не менее важен, чем нагрев. Скорость охлаждения должна быть строго регламентирована, так как она определяет конечную фазовую структуру материала. Например, для нержавеющей сталей слишком быстрое охлаждение может привести к образованию нежелательных хрупких фаз, а слишком медленное – к излишнему росту зерна. В современных производственных линиях этот этап контролируется с помощью систем принудительного охлаждения с регулируемой интенсивностью.

Контроль параметров спекания требует комплексного подхода. Температурные профили оптимизируются с учетом данных дифференциальной сканирующей калориметрии, учитывающих теплофизические характеристики материала. Состав газовой атмосферы поддерживается в соответствии с термодинамическими расчетами равновесия окислительно-восстановительных реакций, где критическим параметром является парциальное давление кислорода [14].

Структурный анализ спеченных изделий включает определение среднего размера зерна, которое подчиняется параболическому закону роста, и оценку фракционной пористости. Современные методы компьютерного моделирования, в частности метод конечных элементов, позволяют прогнозировать распределение термических напряжений в процессе спекания, что особенно важно для изделий сложной геометрии [18].

¹ ГОСТ Р 59650-2021. Литье под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими или керамическими порошками (РМ-технология). Термины и определения.

Особого внимания заслуживает система контроля качества на всех этапах спекания. Современные предприятия оснащаются комплексными системами мониторинга, включающими:

- многоточечный температурный контроль с абсолютной погрешностью не более $\pm 2^\circ\text{C}$;
- лазерные измерители усадки с разрешением 0,1 %;
- газоанализаторы для контроля атмосферы печи;
- системы визуального контроля геометрии изделий.

После завершения спекания все изделия проходят обязательную проверку. Основными контролируруемыми параметрами являются следующие:

- плотность (измеряется методом гидростатического взвешивания или замещающей газовой пикнометрии);
- микроструктура (анализируется с помощью электронной микроскопии);
- механические свойства (определяются на универсальных испытательных машинах);
- геометрические параметры (измеряются с помощью координатно-измерительных машин).

Для особо ответственных деталей, таких как медицинские имплантаты или аэрокосмические компоненты, может применяться дополнительный контроль методами рентгеновской томографии, позволяющий выявить внутренние дефекты, невидимые при поверхностном осмотре.

Заключение

Применение современных систем контроля технологического процесса производства изделий методом МИМ-технологий необходимо ввиду многоэтапности процесса изготовления, для минимизации ошибок и повышения качества продукции. Установлено, что качество гранулята и равномерность распределения компонентов оказывают существенное влияние на дефекты в спеченных изделиях. Определены оптимальные параметры литья (температура, давление, скорость впрыска) и спекания (температурные профили, атмосфера печи). Показано, что современные методы контроля (например, масс-спектрометрия, лазерное сканирование) позволяют минимизировать дефекты и улучшить механические свойства изделий.

Список литературы

1. Philipp I., Rota A. Dr. Ing., Petzoldt F., Simchi A. Manufacturing of multi-functional micro parts by two-component metal injection moulding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33. P. 176–186.
2. Li Y., Yu Y., He H. [et al.]. Metal Injection Moulding in China: Market opportunities and research activities // PIM International. 2020. Vol. 14, № 1. P. 57.
3. Погодина Е. Литье порошковых смесей // Пластикс. Эффективные ТПА. 2013. № 6. С. 34–36.
4. German R., Bose A. Powder Injection Molding. 2nd ed. Metal process Industries Federation. 1997. 490 p.
5. Ye H., Liu X. Y., Hong H. P. Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding – a review // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 200, № 1. P. 12–24. doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2007.10.066
6. Hartwig T., Veltl G., Petzoldt F. [et al.]. Powders for metal injection molding. Journal of the European Ceramic Society. 1998. Vol. 18. P. 1211–1216.
7. Barriere T. Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modeling // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 143–144. P. 636–644.
8. Supati R., Loh N. H., Khor K. A., Tor S. B. Mixing and characterization of feedstock for powder injection molding // Materials Letters. 2000. Vol. 46. P. 109–114.
9. Binet C., Heaney D. F., Spina R., Tricarico L. Experimental and numerical analysis of metal injection molded products // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 164–165. P. 1160–1166. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.128
10. Bose A., Valencia J. J., Spirko J., Schmees R. Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials. MPIF, Princeton, NJ, 1997. P. 18. P. 99–112.
11. Torkar D., Novak S., Novak F. Apparent viscosity prediction of alumina–paraffin suspensions using artificial neural networks // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 203. P. 208–215. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.058
12. Nishiyabu K., Matsuzaki S., Ishida M. [et al.]. Development of Porous Aluminum by Metal Injection Molding // Presented for 9th Int. Conf. on Aluminum Alloys (ICAA9). 2004. P. 376–382.
13. Гини Э. Ч., Зарубин А. М., Рыбкин В. А. Технология литейного производства: Специальные виды литья : учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. В. А. Рыбкина. М. : Издательский центр «Академия», 2005. 352 с.
14. Белоусов В. А. Машины и технология литейного производства. Дипломное проектирование : учеб. пособие. Тула : изд-во Тул-ГУ, 2007. 78 с.

15. Zhang S., Li Y., Liu J. Sintering densification behavior of MIM 316L stainless steel // Powder Metallurgy. 2015. Vol. 58, № 1. P. 59–65.
16. Li Y., Li L., Khalil K. A. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steel // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 183, № 2-3. P. 432–439.
17. Zauner R. Micro powder injection molding // Microelectronic Engineering. 2006. Vol. 83, № 4-9. P. 1442–1444.
18. Liu Z. Y., Loh N. H., Tor S. B. [et al.]. Taguchi analysis of the shrinkage of injection molded parts // Materials & Design. 2003. Vol. 24, № 3. P. 221–230.

References

1. Philipp I., Rota A. Dr. Ing., Petzoldt F., Simchi A. Manufacturing of multi-functional micro parts by two-component metal injection moulding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007;33:176–186.
2. Li Y., Yu Y., He H. et al. Metal Injection Moulding in China: Market opportunities and research activities. *PIM International*. 2020;14(1):57.
3. Pogodina E. Casting of powder mixtures. *Plastiks. Effektivnye TPA = Plastics. Effective TPA*. 2013;(6): 34–36. (In Russ.)
4. German R., Bose A. Powder Injection Molding. 2nd ed. Metal process Industries Federation. 1997:490.
5. Ye H., Liu X.Y., Hong H.P. Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding – a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;200(1):12–24. doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2007.10.066
6. Hartwig T., Veltl G., Petzoldt F. et al. Powders for metal injection molding. *Journal of the European Ceramic Society*. 1998;18:1211–1216.
7. Barriere T. Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;143–144:636–644.
8. Supati R., Loh N.H., Khor K.A., Tor S.B. Mixing and characterization of feedstock for powder injection molding. *Materials Letters*. 2000;46:109–114.
9. Binet C., Heaney D.F., Spina R., Tricarico L. Experimental and numerical analysis of metal injection molded products. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;164–165:1160–1166. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.128
10. Bose A., Valencia J.J., Spirko J., Schmees R. *Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials*. MPIF, Princeton, NJ, 1997;18:99–112.
11. Torkar D., Novak S., Novak F. Apparent viscosity prediction of alumina–paraffin suspensions using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;203:208–215. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.09.058
12. Nishiyabu K., Matsuzaki S., Ishida M. et al. Development of Porous Aluminum by Metal Injection Molding. *Presented for 9th Int. Conf. on Aluminum Alloys (ICAA9)*. 2004:376–382.
13. Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Tekhnologiya liteynogo proizvodstva: Spetsial'nye vidy lit'ya: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy = Technology of foundry production: Special types of casting: a textbook for students of higher educational institutions*. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005:352. (In Russ.)
14. Belousov V.A. *Mashiny i tekhnologiya liteynogo proizvodstva. Diplomnoe proektirovanie: ucheb. posobie = Machines and technology of foundry production. Diploma design: textbook*. Tula: izd-vo Tul-GU, 2007:78. (In Russ.)
15. Zhang S., Li Y., Liu J. Sintering densification behavior of MIM 316L stainless steel. *Powder Metallurgy*. 2015;58(1):59–65.
16. Li Y., Li L., Khalil K.A. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;183(2-3):432–439.
17. Zauner R. Micro powder injection molding. *Microelectronic Engineering*. 2006;83(4-9):1442–1444.
18. Liu Z.Y., Loh N.H., Tor S.B. et al. Taguchi analysis of the shrinkage of injection molded parts. *Materials & Design*. 2003;24(3):221–230.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Никиткин

кандидат технических наук,
заместитель главного металлурга по аддитивным
технологиям и порошковой металлургии,
ФНПЦ «ПО "Старт"» имени М. В. Проценко
(Россия, Пензенская обл., г. Заречный, пр-т Мира, 1)
E-mail: paul-startatom@yandex.ru

Aleksandr S. Nikitkin

Candidate of technical sciences,
deputy chief metallurgist for additive technologies and
powder metallurgy,
FNPC Start named after M.V. Protsenko
(1 Mira avenue, Zarechny, Penza region, Russia)

Анатолий Дмитриевич Семенов

доктор технических наук, профессор кафедры
автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ad-semenov@mail.ru

Anatoliy D. Semenov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department
of automation and remote control,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Михайлович Пастухов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksandr M. Pastukhov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илья Александрович Рубцов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rui2000@yandex.ru

Ilya A. Rubtsov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Павлович Цветков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksandr P. Tsvetkov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 06.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.04.2025

Принята к публикации / Accepted 06.05.2025

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 621.317.791

doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-11

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АППАРАТА ДЛЯ НЕПРЯМОГО МАССАЖА СЕРДЦА В ПРОЦЕССЕ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ

А. А. Трофимов¹, В. А. Баранов², К. А. Ильин³, Е. А. Першин⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹alex.t1978@mail.ru, ²baranov_va2202@mail.ru, ³kirik3271nikita99@yandex.ru, ⁴iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальной задачей разработки аппаратов для непрямого массажа сердца, применяемых в процессе сердечно-легочной реанимации при внегоспитальной остановке сердца, является обеспечение эффективной вентиляции легких без повреждений грудной клетки независимо от персональных особенностей телосложения реанимируемого. Целью работы являлась разработка интеллектуальной информационно-измерительной системы аппарата, которая позволит адаптировать режим функционирования подсистемы формирования давления к персональным особенностям телосложения реанимируемого и организовать ее метрологический самоконтроль. *Результаты.* На основе анализа действующих нормативных документов, характеристик существующих аппаратов и результатов патентных исследований разработана структура интеллектуальной информационно-измерительной системы аппарата для непрямого массажа сердца. *Выводы.* Интеллектуализация информационно-измерительной системы аппарата для непрямого массажа путем введения структурной избыточности в виде группы идентичных каналов измерения давления на грудь реанимируемого на основе тензорезистивного датчика и функциональной избыточности в форме вычисления среднего арифметического 16 синхронных результатов измерения давления повышает эффективность и безопасность выполнения непрямого массажа сердца в процессе сердечно-легочной реанимации.

Ключевые слова: сердечно-легочная реанимация, аппарат для непрямого массажа сердца, интеллектуальная измерительная система, метрологический самоконтроль, датчик давления

Для цитирования: Трофимов А. А., Баранов В. А., Ильин К. А., Першин Е. А. Интеллектуальная информационно-измерительная система аппарата для непрямого массажа сердца в процессе сердечно-легочной реанимации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 89–95. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-11

INTELLIGENT INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF THE DEVICE FOR CARDIOPULMONARY RESUSCITATION

A.A. Trofimov¹, V.A. Baranov², K.A. Ilin³, E.A. Pershin⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹alex.t1978@mail.ru, ²baranov_va2202@mail.ru, ³kirik3271nikita99@yandex.ru, ⁴iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* An urgent task of developing devices for indirect cardiac massage used in the process of cardiopulmonary resuscitation in case of out-of-hospital cardiac arrest is to ensure effective ventilation of the lungs without damage to the chest regardless of the personal characteristics of the resuscitated person's constitution. The aim of the work was to develop an intelligent information-measuring system of the device that will allow adapting the operating mode of the pressure generation subsystem to the personal characteristics of the resuscitated person's constitution and organizing its metrological self-control. *Results.* Based on the analysis of current regulatory documents, characteristics of

existing devices and the results of patent research, the structure of an intelligent information-measuring system of the device for indirect cardiac massage was developed. *Conclusions.* Intellectualization of the information-measuring system of the apparatus for indirect massage by introducing structural redundancy in the form of a group of identical channels for measuring the pressure on the chest of the resuscitated person based on a strain gauge sensor and functional redundancy in the form of calculating the arithmetic mean of 16 synchronous results of pressure measurements increases the efficiency and safety of performing indirect cardiac massage during cardiopulmonary resuscitation.

Keywords: cardiopulmonary resuscitation, cardiac massage apparatus, intelligent measuring system, metrological self-monitoring, pressure sensor

For citation: Trofimov A.A., Baranov V.A., Ilin K.A., Pershin E.A. Intelligent information and measurement system of the device for cardiopulmonary resuscitation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):89–95. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-11

Аппарат для непрямого массажа сердца предназначен для использования в процессе сердечно-легочной реанимации (СЛР) в случае внезапной внегоспитальной остановки сердца путем непрерывных компрессий грудной клетки с необходимой частотой и глубиной продавливания грудины с целью на восстановление спонтанного кровообращения. Аппарат способен производить компрессии в автоматическом режиме при оказании пациенту первой помощи на месте происшествия и во время транспортировки в медицинское учреждение, увеличивая шансы пациента на сохранение жизни.

В состав аппарата входит информационно-измерительная система, осуществляющая измерение показателей состояния реанимируемого, регистрацию, индикацию и передачу в систему скорой медицинской помощи результатов измерений. На основе этой информации медицинские работники дистанционно оценивают состояние пациента, корректируют действия спасателя, находящегося около аппарата, и по прибытии сразу же начинают оказывать реанимационную помощь: введение лекарственных препаратов, проведение искусственное дыхание и т.д.

На данный момент на рынке аппаратов для СЛР выделяются марки LUCAS [1] и ZOLL [2]. Серия устройств Lucas обеспечивает компрессию грудной клетки с помощью поршня с электрическим или пневматическим приводом (рис. 1).



Рис. 1. Аппарат для СЛР компании Lucas:
а – Lucas 2 с электрическим приводом; б – Lucas 1 с пневматическим приводом

Аппарат для СЛР Autopulse компании ZOLL имеет электрический привод и ременной механизм компрессии грудной клетки (рис. 2). Ременной механизм обеспечивает сжатие грудной клетки по верхнему фронту, что позволяет избежать перенапряжения на отдельных участках грудной клетки с переломами ребер.



Рис. 2. Аппарат для СЛР Autopulse компании ZOLL

Основные технические характеристики аппаратов для СЛР Lucas и Autopulse представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики аппаратов для СЛР

Характеристика аппарата	Тип аппарата для СЛР				
	Lucas 1	Lucas 2	Lucas 3.0	Lucas 3.1	Autopulse
Частота компрессий, цикл/мин	100	100 ± 5	102 ± 2	102 ± 2; 111 ± 2; 120 ± 2	80 ± 5
Глубина компрессий, мм	50	40–50	53 ± 2 для пациентов с высотой груди более 185 мм. 40–53 для пациентов с высотой груди менее 185 мм	53 ± 2 для пациентов с высотой груди более 185 мм. 40–53 для пациентов с высотой груди менее 185 мм	20 % высоты груди с абсолютной погрешностью не более +6,3/–12,7 мм
Длительность интервала времени декомпрессии относительно длительности полного цикла, %	50	50 ± 5	50 ± 5	50 ± 5	50 ± 5

Аппараты начальных версий автоматизируют непрямой массаж сердца, но не содержат в своем составе информационно-измерительную систему, позволяющую улучшить качество СЛР и облегчить работу спасателя. В каждой последующей версии аппарата Lucas качество проведения непрямого массажа сердца при СЛР повышается, обеспечивается контроль частоты и глубины сжатия грудной клетки. Для обеспечения безопасности работы устройства и при проведении СЛР в аппарате Lucas 3.1 реализована система управления безопасностью. С ее появлением стало возможным производить автоматическую проверку исправности основных частей аппарата, контролировать в процессе эксплуатации работу блока компрессии, уровень заряда аккумулятора, т.е. в аппарате реализован частичный функциональный самоконтроль.

В аппарате Lucas 3 осуществляется сбор данных о проведении СЛР и формировании отчета о реанимации.

Содержание отчета о СЛР:

- 1) сводка по использованию устройства: время сжатия, коэффициент, скорость, количество компрессий, количество пауз более 10 с и продолжительность самой длинной паузы между компрессиями;
- 2) визуальная временная шкала, показывающая интервалы времени сжатия и паузы;
- 3) журнал регистрации действий спасателя, оповещений о разряде батареи и сигналов тревоги;
- 3) полная информация о настройках аппарата в процессе СЛР;
- 4) результаты комплексного анализа данных специализированным программным обеспечением.

Связь спасателя с диспетчером скорой медицинской помощи обеспечивается по Bluetooth или электронной почте после регистрации устройства через сеть Wi-Fi. Объем памяти аппарата LUCAS 3.1 для хранения данных о процессе СЛР составляет 4 Гб. Собранные данные используются для формирования личной карточки пациента, составления плана постреанимационных мероприятий, а также передаются в региональную информационную медицинскую систему для статистической обработки с целью повышения качества оказания медицинской помощи.

Аппарат для СЛР состоит из следующих основных компонентов: блок питания, механизм компрессии грудной клетки, блок управления с индикатором, блок памяти, центральный процессор; таймеры; динамик, сообщающий о временных интервалах проведения непрямого массажа сердца и паузах для вентиляции легких; датчик перемещения поршня при компрессии грудной клетки.

Анализ технических характеристик существующих аппаратов для СЛР и патентной информации в рассматриваемой области, в частности, патентов US20170246078A1 «Cardiopulmonary resuscitation (CPR) feedback systems and methods», 2017; US5496257A «Apparatus for assisting in the application of cardiopulmonary resuscitation», 1994; US-6332872-B1 «Portable cardiopulmonary resuscitation device with precise compression depth and uniformity», 2001; US20190029919A1 «Automatic cardiopulmonary resuscitation device and control method therefor», 2019; US5327887A Cardiopulmonary resuscitation device, 1994; US20160213559 «Apparatus for providing cardiopulmonary resuscitation and application aid», 2013; US9801782B2 «Support devices for head up cardiopulmonary resuscitation»; EP3037127A1 «Medical device for assisting a user in manually delivering repetitive resuscitation therapy», 2016, показывает, что совершенствование аппарата идет в двух основных направлениях: улучшение конструкции и оптимизация системы управления, составляющей которой является измерительная система.

Измерительная система предназначена для измерения показателей состояния здоровья реанимируемого и функциональных показателей аппарата в процессе эксплуатации. Существенное улучшение метрологических характеристик измерительной системы может быть достигнуто путем интеллектуализации. Согласно ГОСТ Р 8.673–2009 интеллектуализация средства измерений состоит в придании ему свойства адаптации и функции автоматического метрологического самоконтроля, методы которого определены ГОСТ 8.734–2011: прямой метрологический самоконтроль и диагностический метрологический самоконтроль.

Критическим показателем качества выполнения непрямого массажа сердца является давление на грудину, обеспечивающее необходимую глубину сжатия грудины без ее повреждения, поэтому измерительной системе целесообразно придать функцию метрологического самоконтроля датчику силы, который является первичным измерительным преобразователем канала измерения давления поршня на грудину при компрессиях. Сила воздействия поршня на грудину составляет до 500Н, что при диаметре поршня 0,12 м создает давление 44,2 кПа.

Прямой метрологический самоконтроль датчика силы аппарата для СЛР не может быть реализован, поскольку для этого в состав измерительной системы необходимо ввести набор мер массы с суммой номинальных значений 50 кг, что недопустимо утяжеляет аппарат и требует существенных изменений конструкции механизма компрессии для реализации режима самокалибровки путем введения устройства сравнения сил тяжести и компрессии [3–6].

В связи с этим в измерительной системе аппарата для СЛР может быть реализован только диагностический метрологический самоконтроль с формированием опорного значения давления как среднего результата измерения давления группой однотипных тензодатчиков [7]. Для этого на рабочей поверхности поршня, круге диаметром 120 мм, предложено разместить 16 тензорезисторов типа ЕВ 001 производства АО «ННИФИ», г. Пенза (рис. 3).

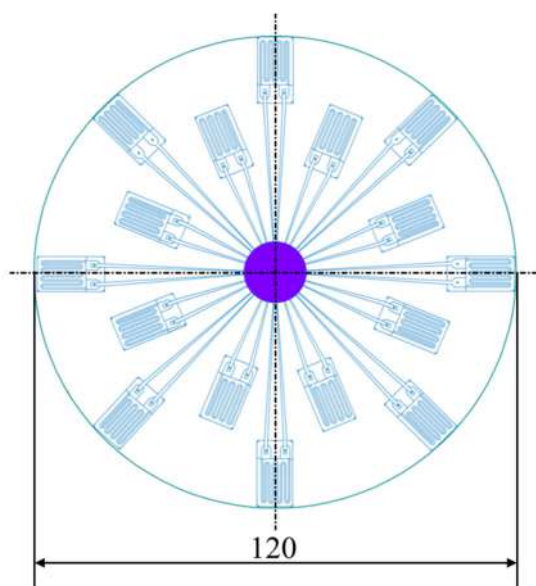


Рис. 3. Расположение тензорезисторов на рабочей поверхности поршня

Основные технические характеристики тензорезистора ЕВ 001 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики тензорезистора ЕВ 001

Характеристики	Показатели
Диапазон измерений при статических нагрузках	± 3000 МкМ/м
при динамических нагрузках	± 3000 МкМ/м
Номинальное электрическое сопротивление	100–800 Ом
Чувствительность в нормальных условиях	1,9–2,3
Температурный режим	–196/+150 °С
Вибрационные ускорения/частотный диапазон	4,9–980/3–100 000 м/с ² /Гц
Ударные ускорения	6860 м/с ²
Масса	0,02 г

Структура аппарата для непрямого массажа сердца с интеллектуальной информационно-измерительной системой представлена на рис. 4. Аппарат состоит из блока управления, который обеспечивает информационное взаимодействие всех компонентов аппарата и формирование отчета о СЛР, блока формирования компрессии, блока измерительных каналов и блока интерфейсов.

Блок измерительных каналов имеет в своем составе электронный электрокардиограф, канал измерения частоты пульса, канал измерения сатурации крови кислородом и канал измерения давления газа в конце выдоха. Электронный электрокардиограф, каналы измерения частоты пульса и сатурации крови кислородом могут быть реализованы аналогично информационно-измерительной системе для телемедицинского мониторинга состояния больного COVID-19 [8].

Блок интерфейсов позволяет аппарату осуществлять оперативную связь между участниками процесса реанимации. Обмен информацией между аппаратом и спасателем в процессе реанимации ведется через пульт управления, дисплей и по аудиоканалу. Одновременно спасатель корректирует свою деятельность в соответствии с рекомендациями диспетчерской скорой медицинской помощи и информирует реанимационную бригаду о текущих значениях показателей состояния реанимируемого в процессе движения реанимобиля к месту реанимации. За счет наличия блока интерфейсов аппарат для СЛР интегрируется в существующую региональную медицинскую информационную систему.

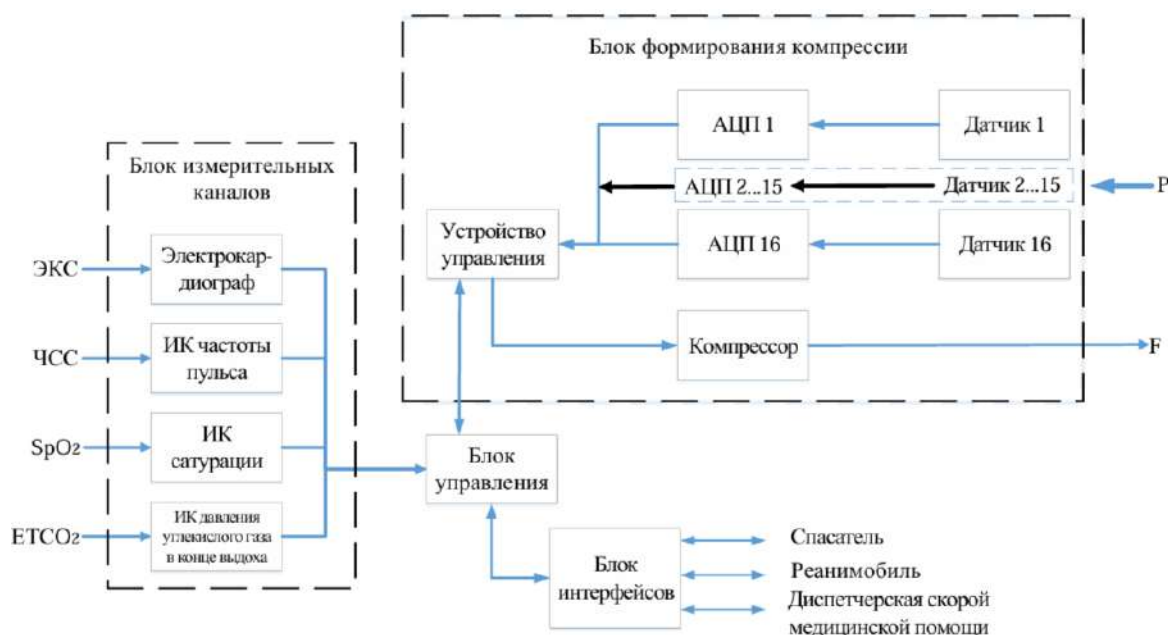


Рис. 4. Структура аппарата для непрямого массажа сердца с интеллектуальной информационно-измерительной системой

Блок формирования компрессии состоит из устройства управления, которое управляет работой компрессора с силой F и канала измерения давления P с диагностическим метрологическим самоконтролем. Метрологический самоконтроль организуется за счет аппаратной

избыточности в виде 16 идентичных каналов измерения давления, состоящих из датчика давления и аналого-цифрового преобразователя, и функциональной избыточности в форме вычисления среднего арифметического 16 синхронных результатов измерения давления.

Заключение

Интеллектуализация измерительной системы является одним из направлений совершенствования технической системы, в состав которой она входит. Аппаратная, функциональная, временная избыточность, вводимая в систему, позволяет придать ей интеллектуальное свойство адаптивности и реализовать функцию метрологического самоконтроля. Применительно к аппарату для непрямого массажа сердца в ходе сердечно-легочной реанимации разработанная интеллектуальная измерительная система позволяет повысить эффективность и безопасность массажа. В измерительной системе реализован диагностический метрологический самоконтроль канала измерения давления при формировании компрессий путем установки на рабочей поверхности поршня 16 идентичных датчиков давления на основе тензорезистора типа ЕВ 001. Значение давления определяется как среднее арифметическое результатов аналого-цифрового преобразования выходных сигналов датчиков. Следующим этапом автоматизации процесса сердечно-легочной реанимации представляется разработка системы искусственной вентиляции легких, что потребует дальнейшего совершенствования интеллектуальной информационно-измерительной системы аппарата для сердечно-легочной реанимации.

Список литературы

1. LUCAS chest compression system. URL: <https://www.lucas-cpr.com>
2. ZOLL AutoPulse NXT Resuscitation System. URL: <https://www.zoll.com>
3. Данилов А. А. Направления совершенствования измерительных систем и их метрологического обеспечения // Измерительная техника. 2023. № 8. С. 24–29. doi: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29
4. Козырев Г. И., Лавров Р. О., Усиков В. Д. Построение интеллектуальной измерительной системы контроля метрологической надежности автоматизированного комплекса метрологического обслуживания вооружения и военной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 3. С. 16–24. doi: 10.21685/2307-5538-2020-3-2
5. Михайлов П. Г., Соколов А. В., Аналиева А. У. [и др.]. Самодиагностика в интеллектуальных преобразователях физических величин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 1. С. 33–41. doi: 10.21685/2307-5538-2019-1-5
6. Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В. [и др.]. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 2. С. 99–107. doi: 10.21685/2307-5538-2019-2-12
7. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.
8. Баранов В. А., Печерская Е. А., Сафронов М. И., Тимохина О. А. Информационно-измерительная система для телемедицинского мониторинга состояния больного COVID-19 // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 85–92. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-10

References

1. LUCAS chest compression system. Available at: <https://www.lucas-cpr.com>
2. ZOLL AutoPulse NXT Resuscitation System. Available at: <https://www.zoll.com>
3. Danilov A.A. Directions of improvement of measuring systems and their metrological support. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2023;(8):24–29. (In Russ.). doi: 10.32446/0368-1025it.2023-8-24-29
4. Kozyrev G.I., Lavrov R.O., Usikov V.D. Construction of an intelligent measuring system for monitoring the metrological reliability of an automated complex for metrological maintenance of weapons and military equipment. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(3):16–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2020-3-2
5. Mikhaylov P.G., Sokolov A.V., Analieva A.U. et al. Self-diagnosis in intellectual converters of physical quantities. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(1):33–41. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2019-1-5
6. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V. et al. Intelligent system of controlled synthesis of oxide coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(2):99–107. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2019-2-12

7. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a strain-resistant absolute pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2012;(2):51–55. (In Russ.)
8. Baranov V.A., Pecherskaya E.A., Safronov M.I., Timokhina O.A. Information and measurement system for telemedicine monitoring of a COVID-19 patient. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(1):85–92. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-10

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksei A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Виктор Алексеевич Баранов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: baranov_va2202@mail.ru

Victor A. Baranov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кирилл Алексеевич Ильин

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kirik3271nikita99@yandex.ru

Kirill A. Ilin

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Егор Андреевич Першин

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Egor A. Pershin

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 24.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.04.2025

Принята к публикации / Accepted 19.05.2025

ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ

А. Ю. Бодин¹, О. Н. Бодин², М. Н. Крамм³

^{1,3} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ Bodin98@mail.ru, ² iit@pnzgu.ru, ³ krammmn@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цифровизация медицинской информации является основным физическим процессом, определяющим характеристики медицинских информационных систем. Цифровые инструменты современной медицины позволяют совершать прорывы в самом подходе к лечению и профилактике заболеваний. В связи с этим совершенствование аналого-цифрового преобразования открывает новые возможности для системы современного здравоохранения. Целью статьи является разработка структуры аналого-цифрового преобразования электрокардиосигнала множественных отведений. *Материалы и методы.* Рассмотрена функциональная схема специализированного аналого-цифрового преобразователя с учетом мультиплексирования аналоговых каналов, произведен расчет чувствительности и необходимого быстродействия канала связи. Рассчитан объем цифровых данных, формируемых на выходе аналого-цифрового преобразователя. Определено влияние количества аналого-цифровых преобразователей на коэффициент мультиплексирования. *Результаты.* Приведен макет блока регистрации множественных отведений электрокардиосигнала, произведено моделирование работы аналого-цифрового преобразователя, получены временные диаграммы процессы регистрации группы отведений. *Выводы.* Функционирование скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики с множественной регистрацией электрокардиосигналов соответствует парадигме современного здравоохранения на ориентацию ранней диагностики и профилактики заболеваний. На основе проведенного анализа, макетирования и моделирования обоснован выбор коэффициента мультиплексирования для системы множественной регистрации электрокардиосигнала.

Ключевые слова: система неинвазивной электрокардиодиагностики, множественная регистрация электрокардиосигналов, аналого-цифровое преобразование, моделирование

Для цитирования: Бодин А. Ю., Бодин О. Н., Крамм М. Н. Особенности аналого-цифрового преобразования в системе множественной регистрации электрокардиосигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 96–104. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-12

FEATURES OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION IN MULTIPLE ELECTROCARDIOSIGNAL RECORDING SYSTEM

A.Yu. Bodin¹, O.N. Bodin², M.N. Kramm³

^{1,3} National Research University "MPEI", Moscow, Russia

² Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ Bodin98@mail.ru, ² iit@pnzgu.ru, ³ krammmn@mail.ru

Abstract. *Background.* Digitalization of medical information is the main physical process that determines the characteristics of medical information systems. Digital tools of modern medicine allow for breakthroughs in the very approach to treatment and prevention of diseases. In this regard, improving analog-to-digital conversion opens up new opportunities for the modern healthcare system. The purpose of the article is to develop a structure for analog-to-digital conversion of multiple-lead ECS. *Materials and methods.* The functional diagram of a specialized analog-to-digital converter (ADC) is considered, taking into account the multiplexing of analog channels, the sensitivity and required speed of the communication channel are calculated. The volume of digital data generated at the output of the analog-to-digital converter is calculated. The effect of the number of ADCs on the multiplexing coefficient is determined. *Results.* The paper presents a layout of the ECS multiple-lead registration unit, simulates the operation of the analog-to-digital converter, and obtains timing diagrams of the registration processes of a group of leads. *Conclusions.* The operation of the screening system of non-invasive electrocardiological diagnostics (SNEDS) with multiple registration of electrocardiographic signals corresponds to the paradigm of modern healthcare on the orientation of early diagnosis and prevention of diseases. Based on

the analysis, prototyping and modeling, the choice of the multiplexing coefficient for the system of multiple registration of electrocardiographic signals (ECS) is substantiated.

Keywords: non-invasive electrocardiological diagnostics system, multiple registration of electrocardiographic signals, analog-to-digital conversion, modeling

For citation: Bodin A.Yu., Bodin O.N., Kramm M.N. Features of analog-to-digital conversion in multiple electrocardiosignal recording system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):96–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-12

Введение

В настоящее время разработаны и реализованы методы определения электрофизиологических характеристик сердца и реконструкции пространственных характеристик источников электрической активности сердца (ЭАС) по сигналам многоэлектродных кардиоотведений. Метод ЭКГ-картирование сердца [1–4] является одним из наиболее информативных методов исследования электрической активности миокарда. Метод позволяет получить максимальную информацию об особенностях электрического поля сердца в любой момент деполяризации и реполяризации желудочков. При регистрации ЭКГ униполярные электроды располагаются на передней, задней и боковых поверхностях грудной клетки, а также на животе. Получаемая таким образом пространственно-временная и амплитудно-временная информация может быть представлена в виде нескольких разновидностей картограмм.

Однако эти методы требуют существенных аппаратных и временных ресурсов, что не позволяет проводить скрининговые обследования с построением карт распределения потенциала для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), связанных с наличием нарушений в возбуждении миокарда.

При проведении массовых обследований в рамках скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики (СНЭКД) осуществляется цифровизация всех этапов «технологического конвейера». Производится регистрация, хранение и обработка ЭКС множественных отведений, выполняется отображение результатов обработки. Структурная схема СНЭКД приведена на рис. 1 [5].

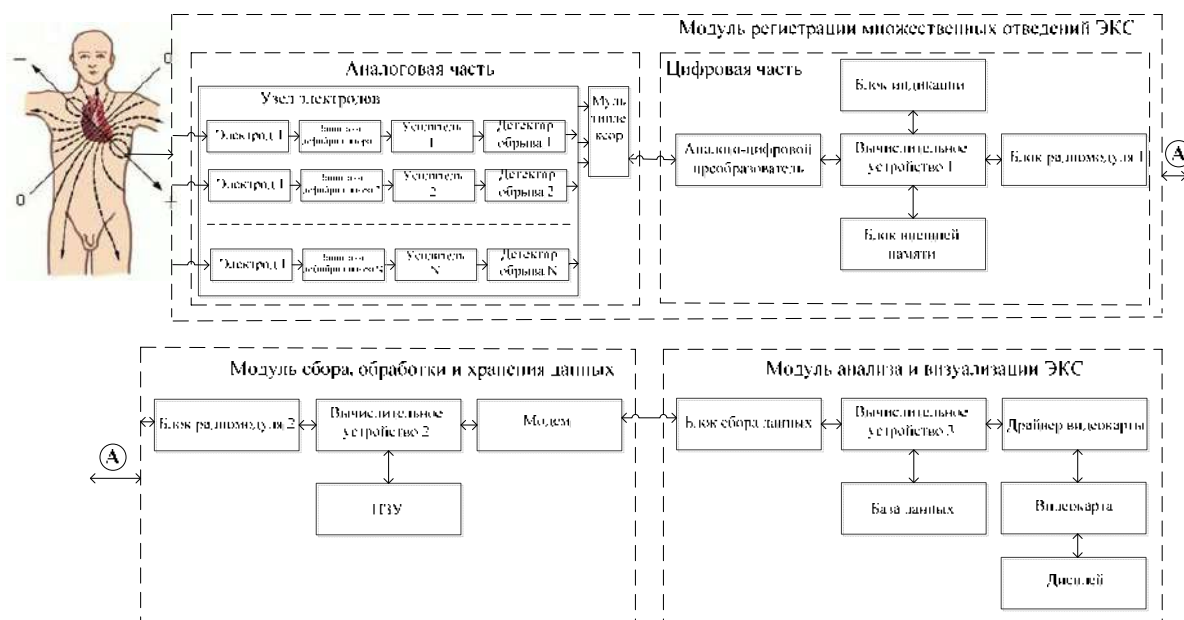


Рис. 1. Структурная схема СНЭКД

По мнению автора [6], функционирование СНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов осуществляется в соответствии с основным трендом трансформации современного здравоохранения: переходу к абсолютно новой модели здравоохранения, так называемой 4П-медицине, которая получила свое название от четырех основополагающих принципов: персонализация, предиктивность, превентивность и партисипативность.

В фокусе 4П-медицины находится индивидуальный подход с целью раннего доклинического выявления заболеваний и разработки комплекса профилактических мер, основываясь на всестороннем знании состояния пациента и заинтересованности пациента в активной форме

вовлечения себя в заботу о своем здоровье. Если классическая медицина имеет дело с проявлениями болезни (в первую очередь речь идет о хронических болезнях), то 4П-медицина направлена на то, чтобы выделить факторы риска, определить предрасположенность пациента к тем или иным болезням и предотвратить их.

Как следует из анализа рис. 1, модуль регистрации множественных отведений ССНЭКД содержит аналоговую и цифровую части. Поскольку регистрируются ЭКС в аналоговом виде, а хранятся ЭКС в цифровом виде, то необходимо аналого-цифровое преобразование ЭКС множественных отведений. В функционировании ССНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов участвуют процессы аналого-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразований. АЦП является одним из фундаментальных «строительных» блоков современных информационно-измерительных систем на этапе сбора данных.

Целью статьи является разработка структуры аналого-цифрового преобразования ЭКС множественных отведений.

Таким образом, с учетом цифровой трансформации здравоохранения актуальность темы статьи заключается в необходимости совершенствования существующих ССНЭКД на основе многоэлектродной регистрации ЭКС.

Материалы и методы

Функциональная схема и чувствительность специализированного АЦП. При многоканальной регистрации ЭКС важно иметь достаточную разрешающую способность для регистрации низкоамплитудных сегментов сигнала. Разрешение АЦП или чувствительность определяется разрядностью АЦП, показывает, насколько точно амплитуда сигнала будет представлена в цифровом виде. Чем выше разрешение, тем точнее фиксируются малые изменения потенциала сигнала.

Рассчитаем чувствительность АЦП с разрядностью 24 бита и уровнем опорного сигнала 2,4 В. Данными характеристиками обладают специализированные для работы с биопотенциалами АЦП [7]:

$$U_{\min} = \frac{U_{ref}}{(2^{res}-1)-1} = \frac{2,4}{2^{23}-1} \approx 0,28 \text{ мкВ}, \quad (1)$$

где $U_{\min}$ – минимальный уровень сигнала, регистрируемый АЦП (чувствительность); U_{ref} – значение опорного сигнала, res – разрядность АЦП.

Функциональная схема АЦП, специализированного для работы с биопотенциалами, приведена на рис. 2 [8].

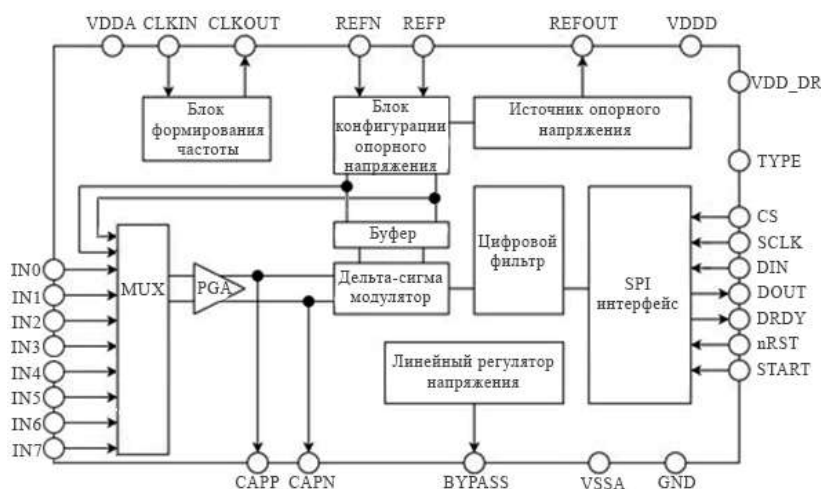


Рис. 2. Функциональная схема специализированного АЦП

Согласно рис. 2 блок аналого-цифрового преобразования в ССНЭКД состоит из восьми измерительных входов, PGA (Programmable Gain Amplifier) – модуля программируемого коэффициента усиления, блока формирователя частоты, дельта-сигма модулятора, SPI интерфейса и других блоков.

Мультиплексирование аналоговых каналов

Мультиплексирование аналоговых каналов (объединение данных с нескольких каналов (электродов) в общий поток для обработки одним АЦП) в предлагаемом подходе к анализу состояния сердца позволяет уменьшить аппаратные затраты на жилет, количество линий передач ЭКС и более эффективно использовать АЦП.

Важной характеристикой мультиплексирования является скорость переключения между каналами. Эта скорость должна быть достаточно высокой, чтобы данные с каждого канала обновлялись с требуемой частотой дискретизации. Например, если для каждого из 12 каналов требуется частота дискретизации 1000 Гц, мультиплексор должен обеспечивать переключение с частотой 12 000 переключений в секунду. Для достижения синхронности всех каналов после мультиплексирования используется программное или аппаратное введение временных меток, что позволяет разделить данные для последующего анализа.

Для решения задачи многоканальной регистрации сигнала [7] необходимо выбрать наиболее оптимальный подход для достижения необходимого количества каналов с помощью формулы

$$K_{MUL} = \frac{N_{electrodes}}{N_{ADC} N_{adc\ channel}}, \quad (2)$$

где K_{MUL} – коэффициент мультиплексирования; $N_{electrodes}$ – количество множественных отведений; N_{ADC} – количество АЦП; $N_{adc\ channel}$ – количество каналов АЦП.

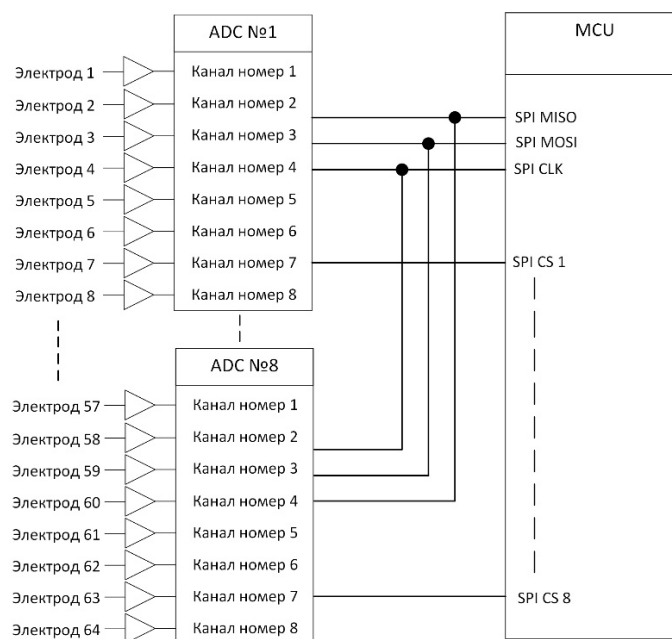
В табл. 1 представлены варианты построения многоканальной системы отведений для регистрации электрокардиосигналов при использовании специализированного для работы с биопотенциалами АЦП [8].

Таблица 1

Влияние количества АЦП на коэффициент мультиплексирования

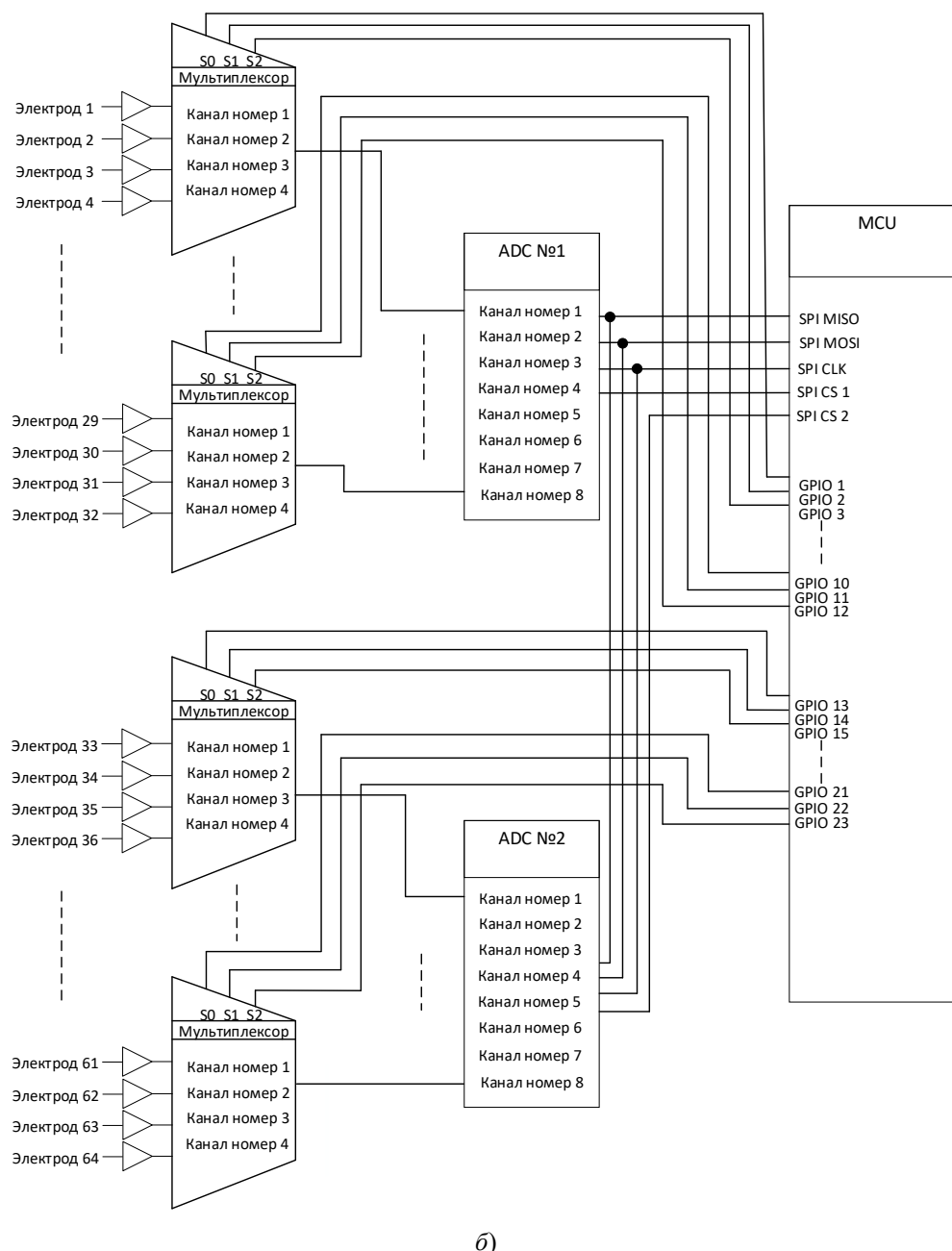
Количество каналов множественных отведений ЭКС	Количество каналов АЦП	Количество АЦП	Коэффициент мультиплексирования (K_{MS})
64	8	1	8
64	8	8	1
64	8	2	4

Структурные схемы вариантов построения модуля регистрации множественных отведений для 64 каналов с различными коэффициентами мультиплексирования приведены на рис. 3.



a)

Рис. 3. Структурная схема АЦП:
a – с коэффициентом $K_{MS} = 1$ (начало)



б)
Рис. 3. Структурная схема АЦП:
б – с коэффициентом $K_{MS} = 4$ (окончание)

Системы регистрации множественных отведений ЭКС с коэффициентом мультиплексирования выше 1 (рис. 3) требуют меньшее количество АЦП. Уменьшение количества АЦП значительно снижает конечную стоимость изделия, так как специализированные АЦП – наиболее дорогая часть системы ССНЭКД.

Результаты и обсуждение

Рассчитаем объем цифровых данных, формируемых на выходе аналого-цифрового преобразователя. Значение потенциалов ЭКС преобразуется в двоичный код согласно следующей формуле [8]:

$$DR_{adc\ channel} = \frac{U_{adc\ channel}}{U_{min}}, \quad (3)$$

где $DR_{adc\ channel}$ – двоичный код, содержащий информацию о значении потенциала; $U_{adc\ channel}$ – значение потенциала отведения; U_{min} – минимальный уровень сигнала (см. формулу 1).

Тогда объем формируемых АЦП данных о текущих значениях потенциалов множественных отведений за интервал дискретизации описывается следующей формулой:

$$ADC_{data\ size} = (N_{cmd\ size} + (DR_{adc\ channel\ size} \cdot N_{electrodes})) = (16 + (24 \cdot 64)) = 1552\ bit, \quad (4)$$

где $ADC_{data\ size}$ – размер цифрового кода в битах; N_{cmd} – размер специфической команды для АЦП, запускающей процесс преобразования, в общем случае имеет длину 16 бит [8]; $DR_{adc\ channel\ size}$ – размер цифрового кода, содержащий информацию о значении потенциала; $N_{total\ channel}$ – количество каналов.

Другими словами, объем данных, необходимых для формирования значений одного отсчета ЭКС множественных отведений, равен 1552 *bit*.

Рассчитаем общий объем формируемой информации о значениях отсчетов потенциалов множественных отведений ЭКС за интервал времени 1 с:

$$ADC_{total\ size} = F_{ECG\ sample} \cdot ADC_{data\ size} = 1000 \cdot 1552 = \frac{1552000\ bit}{8} = 194000\ byte, \quad (5)$$

где $F_{ECG\ sample}$ – частота дискретизации блока регистрации равная 1000 Гц [9]; $ADC_{data\ size}$ – размер цифрового кода в битах (см. формулу (4)).

Таким образом, в процессе аналого-цифровых преобразований за 1 с регистрации формируется массив данных равный 194 000 байтам.

Сформированный АЦП массив данных в реальном масштабе времени записывается в блок памяти модуля регистрации множественных отведений (см. рис. 1).

Следует отметить, что рассчитанный объем информации соответствует размеру данных, содержащихся в одном кардиоцикле (КЦ) с частотой сердечных сокращений (ЧСС) 60 уд./мин, или одно сокращение в секунду. Этот сердечный ритм соответствует нормальному ритму сердца. Согласно рекомендациям ВОЗ [10], нормальный сердечный ритм в покое изменяется в пределах от 55 до 80 уд./мин. ЧСС в покое от 55 до 40 уд./мин свидетельствует о брадикардии, а ЧСС в покое от 80 до 115 свидетельствует о тахикардии. Значения ЧСС в покое менее 40 и более 120 уд./мин являются жизнеугрожающими и требуют незамедлительного врачебного вмешательства.

С учетом сказанного объем информации, соответствующий размеру данных, содержащихся в одном КЦ с ЧСС 40 уд./мин, будет равен 129 334 байт, а с ЧСС 115 уд./мин будет равен 371 834 байт.

Для расчета фактической скорости получения данных о группе каналов был собран прототип, представленный на рис. 4, состоящий из двух специализированных 8-канальных АЦП [8], размещенных на отдельных печатных платах, отладочной платы с микроконтроллером [11].

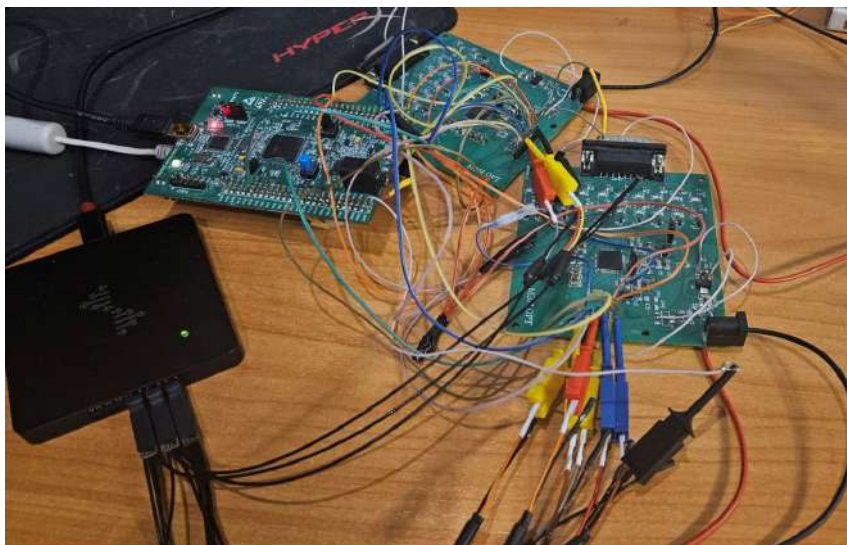


Рис. 4. Макет для расчета скорости передачи и коэффициента мультиплексирования

Для анализа времени получения данных о группе каналов множественных отведений ЭКС к макету (на рис. 4) был подключен логический анализатор [12].

На рис. 5 нулевой канал логического анализатора подключен к линии SPI MISO, 1-й канал к SPI MOSI. 2-й канал к SPI CLK, 3-й канал к SPI CS первого АЦП, 4-й канал к SPI CS второго АЦП, 5-й канал к DRDY (сигнал оповещения о готовности данных) первого АЦП, 6-й канал к DRDY второго АЦП, 7-й и 8-й каналы подключены к сигналу START – начало преобразований.

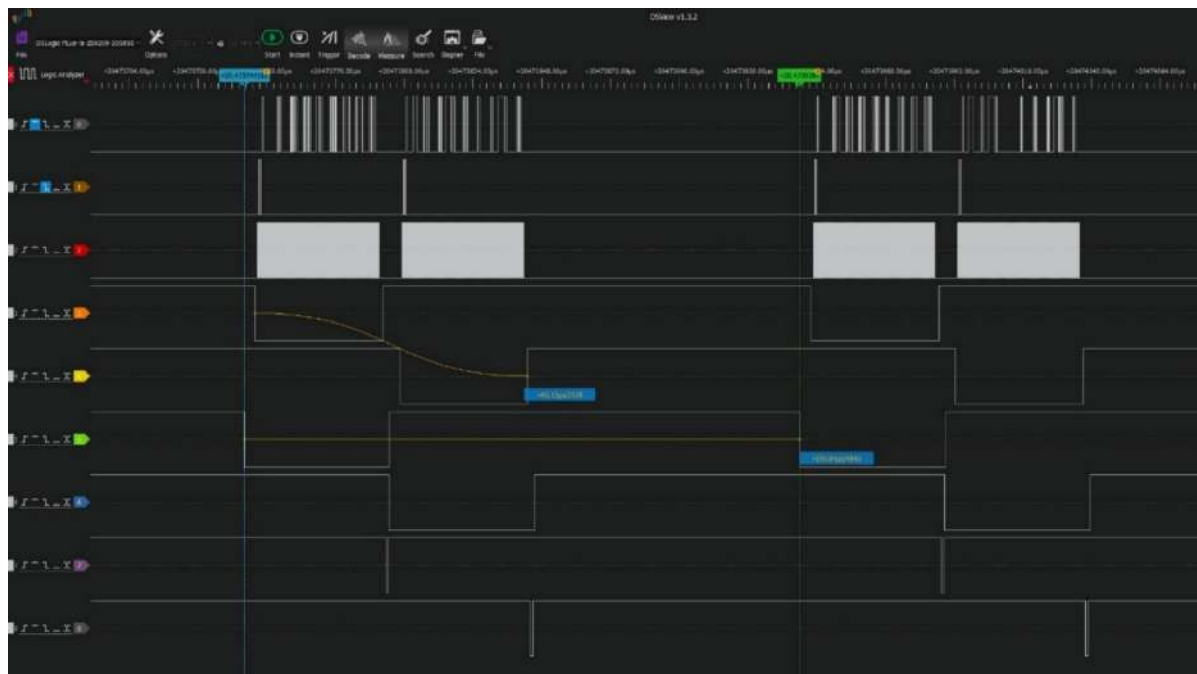


Рис. 5. Временные диаграммы процесса регистрации группы отведений

На рис. 5 интервал времени между спадающим фронтом сигнала на канале 5 и следующим спадающим фронтом, после изменения потенциала на канале 7, соответствует интервалу опроса двух 8-канальных АЦП и равно 193 мкс.

Таким образом, получение данных о 16 каналах занимает 193 мкс.

Выбор коэффициента мультиплексирования зависит от следующих факторов: требуемая частота дискретизации системы, фактическое время получения данных о группе каналов и скорость переключения мультиплексора:

$$K_{MUL_MAX} = \frac{1}{\frac{F_{ECG\ sample}}{t_{obtain\ data} + t_{mul\ switch}}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{(193 \cdot 10^{-6}) + (1 \cdot 10^{-6})} = 5,155, \quad (6)$$

где $F_{ECG\ sample}$ – требуемая частота дискретизации системы, равная 1000 Гц; $t_{obtain\ data}$ – фактическое время получения данных о группе каналов, равное 193 мкс; $t_{mul\ switch}$ – время переключения мультиплексора (с учетом формирования сигнала с микроконтроллера).

Из этого следует, что максимальный коэффициент мультиплексирования, удовлетворяющий требованиям системы, может быть не выше 5. Для реализации задачи множественной регистрации ЭКС согласно табл. 1 и формулам (2), (6) коэффициент мультиплексирования ССНЭКД был выбран 4. Это позволило реализовать систему регистрации, используя только два специализированных 8-канальных АЦП, при этом значительно снизив стоимость изделия и сохранив свободное место на печатной плате.

Заключение

Функционирование ССНЭКД с множественной регистрацией электрокардиосигналов соответствует парадигме современного здравоохранения на ориентацию ранней диагностики и профилактики заболеваний.

На основе проведенных анализа, макетирования и моделирования выбран по критериям стоимости и быстродействия способ построения АЦП с коэффициентом мультиплексирования, равным 4, в ССНЭКД с множественной регистрации ЭКС.

Список литературы

1. Бокерия Л. А., Голухова Е. З. Клиническая кардиология: диагностика и лечение : в 3 т. М. : Издательство НЦССХ им. А. Н. Бакулева, 2011. 1711 с.
2. Амиров Р. З. Интегральные топограммы потенциалов сердца. М. : Наука, 1973. 108 с.
3. Пат. 2651068 Российская Федерация. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин А.Ю. [и др.]. № 2017123613 ; заявл. 05.07.2017 ; опубл. 18.04.2018, Бюл. № 11.
4. Крамм М. Н. Методика расчета ЭКГ-карт наружных потенциалов для модели торса человека в виде эллиптического цилиндра // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : докл. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. (ФРЭМЭ 2012). Владимир, 2012. Кн. 1. С. 208–211.
5. Пат. 2764498 Российская Федерация. Способ и устройство регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / Бодин А.Ю. [и др.]. № 2020122154 ; заявл. 03.07.2020 ; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.
6. Карпов О. Э., Храмов А. Е. Информационные технологии, вычислительные системы и искусственный интеллект в медицине. М. : ДПК Пресс, 2022, 480 с.
7. Бодин А. Ю., Крамм М. Н., Бодин О. Н. [и др.]. Особенности регистрации множественных отведений электрокардиосигналов // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : сб. докл. XV Междунар. науч. конф. (ФРЭМЭ 2022). Владимир, 2022.
8. Специализированные АЦП ADS1298 // Texas Instrument. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/ads1296r.pdf>
9. Analog Device. Дельта-сигма АЦП. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/precision-sar-sigma-delta-converters.html>
10. Рекомендации по вопросам физической активности и малоподвижного образа жизни // Всемирная организация здравоохранения. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337001/9789240014909-rus.pdf>
11. Отладочные платы STM32F4DISCOVERY // STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
12. Логический анализатор // Dreame Source Lab. URL: <https://www.dreamsourcelab.com/product/dslogic-series>

References

1. Bokeriya L.A., Golukhova E.Z. *Klinicheskaya kardiologiya: diagnostika i lechenie: v 3 t. = Clinical cardiology: diagnosis and treatment : in 3 volumes*. Moscow: Izdatel'stvo NTsSSKh im. A.N. Bakuleva, 2011:1711. (In Russ.)
2. Amirov R.Z. *Integral'nye topogrammy potentsialov serdtsa = Integral topograms of heart potentials*. Moscow: Nauka, 1973:108. (In Russ.)
3. Pat. 2651068 Russian Federaton. A method for noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart. Bodin A.Yu. et al. № 2017123613; appl. 05.07.2017; publ. 18.04.2018, Bull. № 11. (In Russ.)
4. Kramm M.N. Methodology for calculating ECG maps of external potentials for a model of the human torso in the form of an elliptical cylinder. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii: dokl. 10-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (FREME 2012) = Physics and radio electronics in medicine and ecology : reports of the 10th International scientific and technical conf. (FRAME 2012)*. Vladimir, 2012;(bk.1):208–211. (In Russ.)
5. Pat. 2764498 Russian Federation. Method and device for recording multiple leads of an electrocardiosignal. Bodin A.Yu. et al. № 2020122154; appl. 03.07.2020; publ. 17.01.2022, Bull. № 2. (In Russ.)
6. Karpov O.E., Khramov A.E. *Informatsionnye tekhnologii, vychislitel'nye sistemy i iskusstvennyy intellekt v meditsine = Information technologies, computing systems and artificial intelligence in medicine*. Moscow: DPK Press, 2022:480. (In Russ.)
7. Bodin A.Yu., Kramm M.N., Bodin O.N. et al. Features of registration of multiple leads of electrocardiosignals. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii: sb. dokl. XV Mezhdunar. nauch. konf. (FREME 2022) = Physics and radio electronics in medicine and ecology : collection of reports of the XV International scientific conf. (FRAME 2022)*. Vladimir, 2022. (In Russ.)
8. Specialized ADS1298 ADC. Texas Instrument. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/ads1296r.pdf>
9. Analog Device. *Del'ta-sigma ATsP*. Available at: <https://www.analog.com/en/technical-articles/precision-sar-sigma-delta-converters.html>

10. Recommendations on physical activity and a sedentary lifestyle. *Vsemirnaya organizatsiya zdoravookhraneniya = World Health Organization*. (In Russ.). Available at: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/337001/9789240014909-rus.pdf>
11. STM32F4DISCOVERY debugging boards. *STMicroelectronics*. (In Russ.). Available at: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
12. Logic Analyzer. *Dream Source Lab*. Available at: <https://www.dreamsourcelab.com/product/dslogic-series>

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Юрьевич Бодин

аспирант,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 17, стр. 1Г)
E-mail: Bodin98@mail.ru

Andrey Yu. Bodin

Postgraduate student,
National Research University "MPEI"
(build. 1G, 17 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Михаил Николаевич Крамм

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 17, стр. 1Г)
E-mail: krammmn@mail.ru

Mikhail N. Kramm

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of fundamentals of radio engineering,
National Research University "MPEI"
(build. 1G, 17 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 02.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 01.04.2025

Принята к публикации / Accepted 05.05.2025